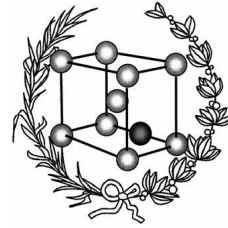


Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y
Puertos



**Análisis de la variación de propiedades termo físicas del
hormigón expuesto a procesos de alta temperatura**

Proyecto de fin de carrera

Jesús González Gil
Grado de Ingeniero de Materiales

Directora:
María Cruz Alonso Alonso
Dra. Ciencias Químicas

Tutor:
Jose Ygnacio Pastor Caño
Dr. Ingeniería de Materiales

2018-2019

A mis padres

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi tutora M. Cruz Alonso, todos los conocimientos sobre el hormigón que he adquirido durante estos meses, además de haber podido formar parte de su grupo de trabajo: Gestión de riesgo y seguridad en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja-Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Durante mi estancia he realizado este proyecto, cuya parte experimental he compartido con mis compañeros Tamara Lucio Martín, Javier Puentes Mojica, Marta Roig Flores y resto de miembros del departamento, a los que debo agradecer sus enseñanzas y paciencia durante nuestra convivencia en el día a día. Durante este periodo de 8 meses he podido aprender y desarrollarme en el mundo de la investigación y el ámbito experimental.

Quiero agradecer también a mi tutor del proyecto de la Escuela Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Jose Ygnacio Pastor Caño por iniciarme en el estudio del hormigón, así como el gran interés que despierta en los alumnos en sus asignaturas.

Agradecer a mis padres y mi hermano, mis compañeros de universidad, David y Héctor, por sus consejos y ayuda brindados en todo momento, han hecho posible la realización de este proyecto.

A todos ellos, gracias.

Resumen

El sector energético hace uso de estructuras de grandes dimensiones para el transporte de energía, como en centrales geotérmicas, nucleares o termosolares. Dichas estructuras están fabricadas comúnmente de hormigón, que debe estar expuesto a elevadas temperaturas durante tiempos prolongados en su vida en servicio. El presente proyecto se centra en la identificación de los procesos fisicoquímicos que se producen en el hormigón sometido a ciclos de fatiga térmica a alta temperatura. Para ello se empleó un hormigón capaz de soportar dichas condiciones basado en cemento de aluminato de calcio.

Se estudiaron los cambios inducidos por las altas temperaturas en las propiedades térmicas y eléctricas del hormigón, trabajando con distintos tipos de árido y presencia de fibras de polipropileno. Se evaluó la evolución de la resistencia eléctrica y conductividad térmica con la temperatura, así como su relación con la pérdida de masa. Se identificaron los procesos de pérdida de agua libre y deshidratación de la pasta de cemento, estableciendo una relación con la variación de dichas propiedades a elevada temperatura. Ante la dificultad que conlleva el estudio del hormigón a alta temperatura, además de la inexistencia de un método estandarizado de medida de resistencia eléctrica y conductividad térmica, se diseñaron protocolos para la toma de valores.

El trabajo concluye con la determinación de la resistencia eléctrica del hormigón como método para evaluar su secado, mediante su relación con la pérdida de agua libre. Se identificaron los procesos más importantes que sufre el hormigón a temperatura elevada con la disminución de la conductividad térmica.

Abstract

Energy sector makes use of large dimensions structures in energy transport, such as nuclear, geothermal or thermosolar plants. These structures are commonly made of concrete, which must be exposed to long time periods high temperatures during its service life. This project focuses on the identification of physicochemical processes produced in concrete under thermal fatigue cycles at high temperature conditions. In order to achieve those conditions, a calcium aluminate cement was employed.

Changes induced by high temperatures in the thermal and electrical properties of concrete were studied, working with different types of aggregate and presence of polypropylene fibers. The evolution of electrical resistance and thermal conductivity with temperature was evaluated, as well as its relationship with mass loss. Free water loss and dehydration of cement paste processes were identified, establishing a relationship with the variation of these properties at high temperature. Because of difficulty in the high temperature behaviour of concrete study, and the absence of a standardized method of measuring electrical resistivity and thermal conductivity, protocols were designed for values collection.

The project concludes with the determination of the concrete's electrical resistance as a method to evaluate its drying, through its relationship with free water loss. The most important processes suffered by concrete at high temperatures were identified, obtaining lower values of thermal conductivity.

Índice de contenido

1	Introducción	1
1.1	Consumo energético global	1
1.2	Emisiones de CO ₂	2
1.3	Energías renovables	3
1.4	Estructuras para la energía térmica	4
1.5	Almacenamiento de energía térmica.....	7
1.5.1	Calor sensible	8
1.5.2	Calor latente.....	11
1.5.3	Calor termoquímico.....	12
1.6	Proyecto NewSOL	13
2	Objetivos	15
3	Estado del arte	17
3.1	Introducción	17
3.2	Estudios desarrollados	17
3.3	Evolución de los componentes del hormigón a alta temperatura	18
3.3.1	Pasta de cemento	18
3.3.2	Áridos	20
3.3.3	Fibras de polipropileno.....	21
3.4	Variación de propiedades del hormigón a alta temperatura	21
3.4.1	Pérdida de masa.....	21
3.4.2	Contracción y expansión térmica	22
3.4.3	Resistencia eléctrica	22
3.4.4	Conductividad térmica.....	24

4	Campana experimental.....	27
4.1	Caracterización de cemento y áridos	27
4.2	Dosificaciones	28
4.3	Fabricación de las probetas.....	29
4.3.1	Amasado	30
4.4	Propiedades térmicas y metodología	31
4.4.1	Conductividad térmica	31
4.4.2	Resistencia eléctrica	33
4.4.3	Pérdida de masa.....	33
4.5	Ensayos realizados.....	34
4.5.1	Estudio del proceso de secado (20- 105°C).....	35
4.5.2	Estudios de los procesos de deshidratación y ciclos térmicos (105-600°C) a alta temperatura.	36
5	Análisis de resultados	39
5.1	Cambios fisicoquímicos del hormigón durante el secado (25-105°C)	39
5.1.1	Pérdida de masa (agua libre de los poros).....	39
5.1.2	Conductividad térmica	41
5.1.3	Resistencia eléctrica	43
5.1.4	Resistencia eléctrica y pérdida de masa	46
5.2	Proceso de deshidratación y calentamiento del hormigón hasta 600°C	47
5.2.1	Pérdida de masa.....	47
5.2.2	Conductividad térmica	49
6	Conclusiones	53
7	Referencias.....	57

8	Anexos.....	63
8.1	Unidad de adquisición de datos Agilent 34970A	63
8.2	Equipo de conductividad QTM-700/710 Kyoto Electronics	70

Lista de figuras

Figura 1: Consumo mundial de energía anual en tonelada equivalente de petróleo. Fuente: [1]	1
Figura 2: Complejo Geotérmico Larderello, Italia [6].....	4
Figura 3: Central de energía nuclear Bellefonte, Hollywood, Alabama [8]	5
Figura 4: Esquema de central energética termo solar [7]	6
Figura 5: a) Campo de heliostatos en central termosolar de torre, “ <i>Gemasolar</i> ” [11], b) Colectores cilindro parabólicos [12], c) Reflector lineal Fresnel [13], d) Campo de discos parabólicos Stirling [14]	7
Figura 6: Central Gemasolar, Torresol Energy, con tecnología de torre central y sistema de almacenamiento térmico de dos tanques (110 GWh/año) [21].....	9
Figura 7: Módulo de almacenamiento térmico en hormigón sin aislamiento térmico (Stuttgart, Alemania) [24].....	10
Figura 8: Sistema de almacenamiento de energía térmica de tanque de termoclina [16]	11
Figura 9: a) Molde para la medida de temperature, b) Molde para la medida de Resistencia eléctrica, c) Probetas con termopar y mallas metálicas embebidas.....	30
Figura 10: Montaje del ensayo de conductividad térmica en el interior del horno	32
Figura 11: Evolución de la temperatura durante los ensayos de secado 1 (izquierda) y 2 (derecha)	36
Figura 12: Evolución de la temperatura en el estudio de los procesos de deshidratación y ciclos térmicos a alta temperatura	38
Figura 13: Evolución de la pérdida de masa durante el secado-1 del mortero ternario-4 (derecha) y silícico-2	40
Figura 14: Evolución de la pérdida de masa durante el secado-2 del mortero ternario-5	41

Figura 15: Evolución de la conductividad térmica durante el secado-1 del mortero ternario-5	42
Figura 16: Evolución de la conductividad térmica durante el secado (1°C/min) hasta 105°C de los morteros ternario-1, 2, 3 y silícico-1.....	43
Figura 17: Evolución de la resistencia eléctrica durante el secado-1 del mortero ternario-3	44
Figura 18: Evolución de la resistencia eléctrica durante el secado-1 de los morteros ternario-4 y silícico-2	45
Figura 19: Evolución de la resistencia eléctrica durante el secado-2 del mortero ternario-5.....	46
Figura 20: Evolución de la resistencia eléctrica y pérdida de masa durante el secado-1	47
Figura 21: Pérdida de masa de los morteros tras secado, deshidratación y ciclos de fatiga térmica.....	48
Figura 22: Evolución de la pérdida de masa del mortero ternario-3 durante el secado, deshidratación y ciclos de fatiga a 1°C/min	49
Figura 23: Evolución de la conductividad térmica de los morteros ternario-1, 2, 3 y silícico-1	50
Figura 24: Evolución de la conductividad térmica durante la etapa-2: ciclos térmicos hasta 600°C de los morteros ternario-1, 2, 3 y silícico-1	51

Lista de abreviaturas

OPC	Cemento Portland Ordinario
CAC	Cemento de aluminato de calcio
PPF	Fibras de polipropileno
C ₃ S	Silicato de tricalcio
C ₂ S	Silicato de dicalcio
C ₃ A	Aluminato de tricalcio
C ₄ AF	Ferritoaluminato tetracálcico
STE	Energía termosolar (Solar Thermal Energy)
TES	Almacenamiento de energía térmica (Thermal Energy Storage)
HTF	Fluido térmico caloportador (Heat Transfer Fluid)
GEI	Gases de efecto invernadero
PVP	Energía fotovoltaica (Photovoltaic Power)
PWR	Reactor de agua a presión (Pressurized Water Reactor)
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas por el Cambio Climático
GEI	Gases de efecto invernadero
PCM	Material con Cambio de Fase (Phase Change Material)
CSP	Concentración de Energía Solar (Concentrating Solar Power)
HAC	Cemento de Alto contenido en Alúmina (High Aluminate Cement)
w/c	Relación agua/cemento (water/cement)
c/a	Relación cemento/árido (cement/aggregate)

Lista de símbolos

λ	Conductividad térmica	[W/m·°C]
m_1	Masa inicial tras curado	[g]
m_2	Masa final tras ciclos de temperatura	[g]
T_1	Temperatura inicio medida conductividad térmica	[°C]
T_2	Temperatura final medida conductividad térmica	[°C]
t_1	Tiempo inicial medida conductividad térmica	[s]
t_2	Tiempo final medida conductividad térmica	[s]
R	Resistencia eléctrica	[Ω]
κ	Factor de forma	[m]
ρ	Resistividad	[$\Omega \cdot m$]

1 Introducción

1.1 Consumo energético global

Desde su origen, el ser humano ha hecho uso de la energía en todas sus formas, pasando por el empleo de animales en la generación de energía mecánica, hasta las actuales energías renovables o los combustibles fósiles. Su demanda global ha sufrido un aumento a lo largo de la historia, conforme al incremento de la población humana y sus necesidades. Para ello, se ha servido principalmente de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural, favoreciendo su agotamiento en un corto periodo de tiempo. Su consecuencia principal ha sido el aumento de la temperatura global media debido al deterioro de la capa de ozono, así como la contaminación de ciudades y entornos industriales. En la Figura 1 se muestra el consumo mundial de energía a lo largo de las dos últimas décadas, en función de su origen. Se puede observar que las fuentes de energía citadas anteriormente dominan como las principales contribuyentes a lo largo de los años.

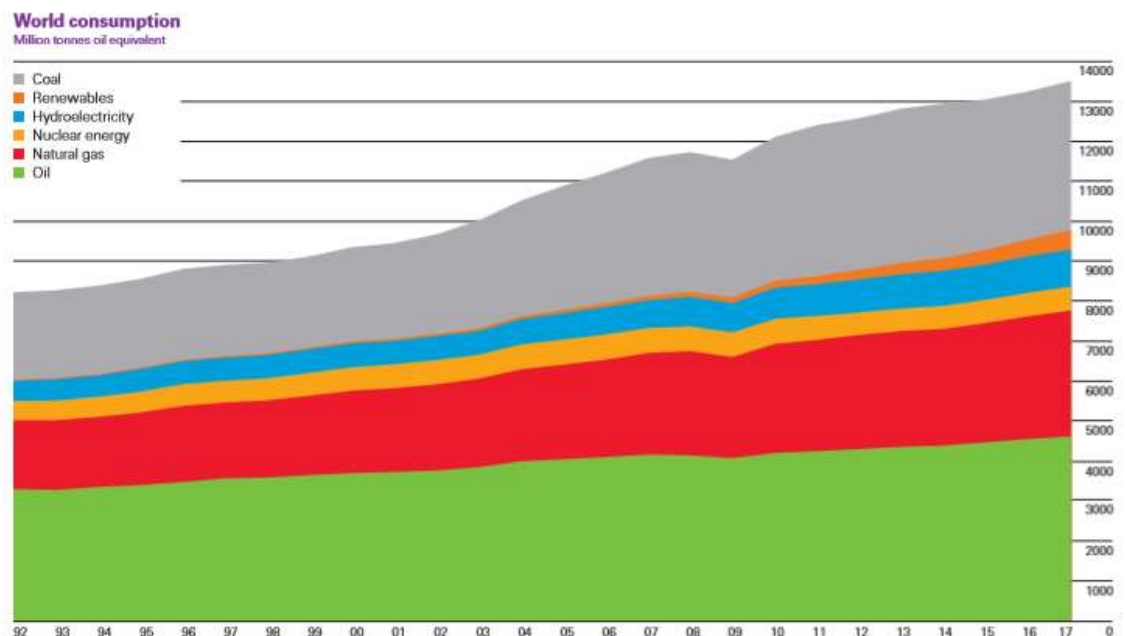


Figura 1: Consumo mundial de energía anual en tonelada equivalente de petróleo. Fuente: [1]

Sin embargo, de acuerdo con “BP Statistical Review”:

“Las energías renovables también han aumentado durante 2017. Destacando el empleo de la energía eólica, que supone más de un 50% del total; la energía solar con más de un 30%; así como la hidroeléctrica y nuclear” [1].

En el ámbito político, la situación representada en la Figura 1, ha supuesto un paso atrás en los objetivos fijados durante el Protocolo de Kyoto (1997), ratificado por China desde 2005; el Acuerdo de París (2015); y las sucesivas cumbres de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Su objetivo principal ha sido la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), permitiendo el desarrollo económico sin amenazar la destrucción de ecosistemas y la producción de alimentos.

1.2 Emisiones de CO₂

El dióxido de carbono (CO₂), forma parte de los gases de efecto invernadero (GEI), junto con el metano, óxido de nitrógeno y ozono. Desde la revolución industrial (1750) su concentración en la atmósfera se ha incrementado un 30%, permitiendo el aumento de la temperatura global media. Con el objetivo de reducir dicho aumento por debajo de los 2°C, o incluso limitarlo a 1.5 °C, se celebró en 2015 el anteriormente mencionado, Acuerdo de París, reuniendo a 195 países del mundo. A raíz de dicho acuerdo, se han desarrollado diversos estudios acerca de cómo evitar sobrepasar dicho umbral.

Mcglade y P. Ekins, desarrollaron un estudio que sugería una serie de medidas a tomar entre 2010 y 2020, para cumplir los objetivos fijados [2].

- Eliminar el carbón del mix energético global.
- Conservar un tercio de las reservas de petróleo.
- Conservar la mitad de las reservas de gas.
- Conservar el 80% de las actuales reservas de carbón entre 2010 y 2050.

Por otro lado, M. Meinshausen et al., cuantificaron las emisiones de gases de efecto invernadero en el periodo de 2000-2050. Concluyendo en la necesidad de limitarlas a 1000

gigatoneladas (GT), para evitar que el aumento de temperatura supere 2°C, lo que supondría un 25% de las emisiones totales estimadas [3].

1.3 Energías renovables

El Acuerdo de París entrará finalmente en vigor en 2020. Este acontecimiento supone un horizonte político favorable al empleo de energías renovables, haciendo que su uso cobre importancia. Su ventaja respecto al uso de combustibles fósiles en la producción de energía es la de ser inagotables, ya que su disponibilidad depende del sol y los ciclos naturales. Su creciente competitividad y la capacidad de reducir la dependencia energética de las fuentes fósiles han despertado especial interés de cara a su empleo y desarrollo. En la Tabla 1 puede contemplarse las principales fuentes de energías renovables y sus aplicaciones [4].

Tabla 1: Principales fuentes de energía y renovables y sus opciones de uso

Fuente de energía	Conversión de energía y opciones de uso
Hidráulica	Generación eléctrica
Biomasa	Producción eléctrica y térmica
Geotérmica	Generación eléctrica, calefacción y agua caliente sanitaria
Solar	Secadores solares, sistemas solares domésticos, cocina solar
Solar directa	Fotovoltaica, generación de energía térmica, calentadores de agua.
Eólica	Generación eléctrica, aerogeneradores, molinos de viento, bombas de agua
Mareomotriz	Presas, corrientes de marea
Undimotriz	Generación eléctrica, diversos diseños

1.4 Estructuras para la energía térmica

El sector energético hace uso de estructuras de grandes dimensiones, cuyas condiciones de servicio son cada vez más exigentes. La búsqueda de la eficiencia en la conversión de energía térmica a energía eléctrica lleva implícita la operación a altas temperaturas. Actualmente, las condiciones extremas que tienen lugar hacen difícil la elección de materiales que puedan soportarlas y tengan precios razonables. Algunas de estas estructuras deben ser capaces de soportar durante largos períodos, elevadas temperaturas, así como gradientes y ciclos térmicos.

Las estructuras más relevantes que deben soportar calor en servicio pueden encontrarse en: centrales geotérmicas, nucleares y termosolares. En las centrales geotérmicas como la que aparece en la Figura 2, son necesarias estructuras para la conducción de fluidos con temperaturas entre 200-350°C, localizados a profundidades de 3 Km. El uso de estructuras de hormigón puede emplearse en cimientos y pilares para el intercambio de energía geotérmica, además de elemento estructural [5].



Figura 2: Complejo Geotérmico Larderello, Italia [6]

En centrales nucleares, Figura 3, las temperaturas en el reactor pueden oscilar los 350°C. El reactor se encuentra en el interior del edificio de contención, generalmente compuesto de hormigón, acero o ambos, y constituye la barrera última para evitar emisiones al exterior [7].



Figura 3: Central de energía nuclear Bellefonte, Hollywood, Alabama [8]

En cuanto a las centrales termosolares, son empleadas en la generación de energía a partir de la concentración de la radiación solar directa. A pesar de existir distintos tipos de centrales termosolares, todas ellas se componen de: un sistema captador (concentrador), absorbedor (receptor), un convertor de potencia, y en ocasiones una caldera alimentada por combustible y un sistema de almacenamiento térmico, representados en la Figura 4.

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

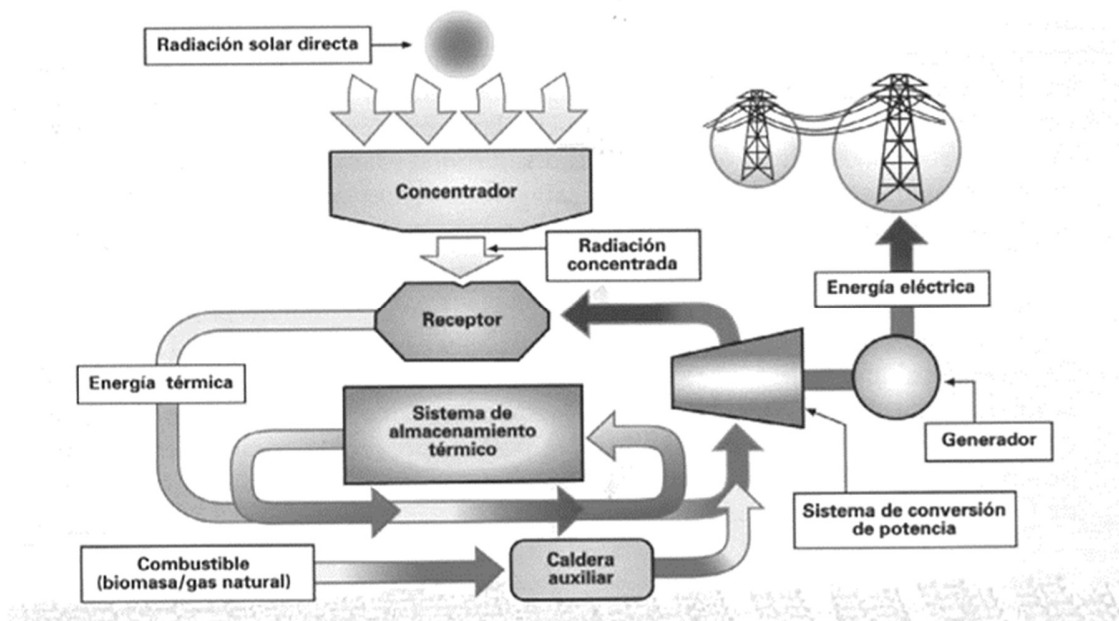


Figura 4: Esquema de central energética termo solar [7]

Su funcionamiento se basa en la recepción de la radiación solar por medio del sistema captador, siendo redirigida y concentrada sobre el absorbedor o receptor. Por su interior circula un fluido, denominado Heat Transfer Fluid (HTF) o fluido caloportador. EL HTF se calienta a su paso por el absorbedor aumentando con ello su energía térmica. La temperatura alcanzada variará dependiendo del HTF empleado y su estabilidad térmica: Therminol VP-1 hasta 400°C [9]; a temperaturas moderadas (<200°C) agua desmineralizada o Etilenglicol; y a temperaturas elevadas, aceite sintético compuesto por difenil éter (C_6H_5)O en un 75% y por bifenilo (hidrocarburo aromático $C_{12}H_{10}$) en un 75%, limitado a 390°C por riesgo de explosión [10].

La clasificación de centrales termosolares puede realizarse por el tipo de tecnología empleada en la concentración solar, Figura 5. En la actualidad existen las centrales de torre, colectores cilindro- parabólicos, reflectores lineales Fresnel, y disco parabólico Stirling.



Figura 5: a) Campo de heliostatos en central termosolar de torre, “Gemasolar” [11], b) Colectores cilindro parabólicos [12], c) Reflector lineal Fresnel [13], d) Campo de discos parabólicos Stirling [14]

Independientemente del sistema captador que utilicen, algunas centrales están dotadas de un sistema de almacenamiento térmico. Su empleo hace posible satisfacer la demanda energética cuando las condiciones climatológicas no permiten la concentración de radiación solar [15]. Al igual que en centrales nucleares o geotérmicas, se sirven de grandes estructuras sometidas a elevada temperatura que se comentarán a continuación.

1.5 Almacenamiento de energía térmica

Así como la energía eólica y fotovoltaica, la energía proveniente de centrales termosolares también es muy variable. La causa principal es la variación en la intensidad de la radiación solar y los periodos nocturnos o nubosos. Este hecho, además se ve afectado con la diferencia entre su disponibilidad y la demanda de energía. Para solucionar dicho problema,

existe la tecnología de almacenamiento térmico que incorporan algunas centrales. Permite adaptar la producción de energía a la demanda, y aumentar así su capacidad de suministro. Actualmente, la técnica más usada es el método de almacenamiento de calor sensible, aunque existen otras como el calor latente o termoquímico, las cuales han sido objeto de estudio en los últimos años [16].

1.5.1 Calor sensible

El almacenamiento por calor sensible consiste en la acumulación de energía térmica en un medio sólido o líquido aumentando su temperatura. La cantidad de energía que es capaz de almacenar un material a una determinada temperatura dependerá de su calor específico.

El almacenamiento de calor sensible a baja temperatura se emplea en el ámbito doméstico como calentadores solares de agua. La tecnología del colector mediante tuberías por las que circula agua o materiales con cambio de fase (PCM) constituye un área de estudio muy interesante [17]. Sin embargo, en la actualidad ya existen sistemas de tanques de agua que son calentados por la radiación solar en Vojens, Dinamarca, o la tecnología de almacenamiento geotérmico que se ha mencionado anteriormente para aplicaciones de calefacción y climatización [18].

A elevada temperatura, su principal aplicación es la generación de electricidad mediante ciclos termodinámicos de concentración de energía solar (CSP), que tiene lugar en las centrales termosolares. Actualmente los tipos de almacenamiento existentes son: dos tanques de almacenamiento de sales fundidas, módulos de hormigón y de forma más reciente, tanque de almacenamiento de sales fundidas de termoclina.

Sistema de dos tanques

El sistema de almacenamiento se compone de dos tanques que contienen sales fundidas. La existencia de dos tanques se debe a que uno se encarga de almacenar la fracción fría y otro la fracción caliente de las sales. En centrales termosolares como Gemasolar, (Sevilla, España) también son usadas como fluido caloportador (HTF) [11]. Comúnmente se hace uso de una sal binaria hecha de nitratos de sodio y potasio (60% NaNO_3 y 40% KNO_3) conocida como Sal Solar, cuya temperatura de almacenamiento varía entre 288-565°C [19].

Su principio se basa en el aprovechamiento de las fluctuaciones de intensidad solar durante el día para almacenar dicho exceso en forma de energía térmica. De este modo, podrá emplearse en satisfacer la demanda energética durante los periodos en los que no existe radiación solar [20]. Para llevar a cabo este proceso, el HTF, es dirigido al intercambiador de calor donde la energía solar térmica del fluido se intercambia con la sal fundida elevando así su temperatura. A continuación, las sales fundidas calientes se bombean al tanque caliente para su almacenamiento. En periodos donde la demanda de energía es superior a la generada en el campo solar, el HTF circula a través del intercambiador de calor obteniendo el calor almacenado por las sales fundidas. Posteriormente, la sal fundida es bombeada al tanque frío para comenzar un nuevo ciclo. Para evitar que la sal fundida se enfríe, es común la instalación de calentadores en el tanque frío para mantener la temperatura por encima de 220°C [19]. En la Figura 6 se muestra un esquema con los componentes de la central de Gemasolar: 1) campo de heliostatos, 2) tanque de sales frías (290°C), 3) receptor situado en la torre donde las sales son calentadas (565°C), 4) tanque de sales calientes, 5) generador de vapor, 6) turbina, 7) generador eléctrico y 8) transformador.

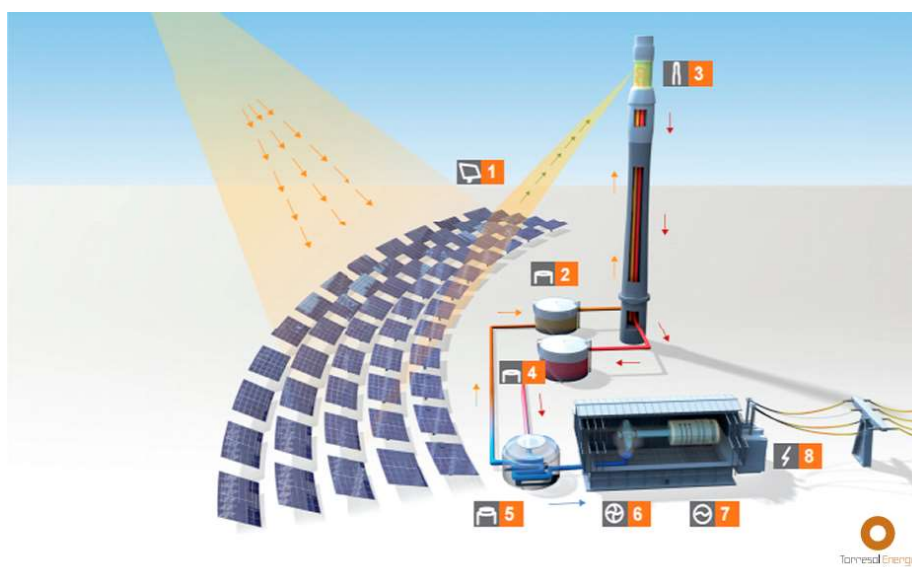


Figura 6: Central Gemasolar, Torresol Energy, con tecnología de torre central y sistema de almacenamiento térmico de dos tanques (110 GWh/año) [21]

Sistema modular de hormigón

En este caso el HTF circula a través de un medio de almacenamiento, el cual puede ser cerámico, hormigón o material reciclado cargándolo y descargando térmicamente. La transferencia de calor tiene lugar entre el HTF y el material de almacenamiento por medio de tuberías de acero embebidas en los módulos de hormigón. La experiencia actual permite temperaturas de trabajo hasta 400°C. Un aspecto clave es la compatibilidad entre el HTF y el material de almacenamiento, para evitar cambios en sus propiedades físicas o degradación [22]. Resulta un método de almacenamiento interesante, de cara al uso de residuos reciclados en lugar de sales fundidas, cuyo coste es mucho menor que el sistema de sales fundidas [23]. Durante 2008 Laing et al. desarrollaron un sistema de almacenamiento térmico empleando hormigón, Figura 7. Sus dimensiones fueron de 20 m³, siendo capaz de soportar ensayos en vivo temperaturas entre 300-400°C, y alrededor de 50 ciclos térmicos. Su capacidad de almacenamiento permaneció constante durante dicho periodo (474 kWh), demostrando que el hormigón es un material apto para esta aplicación [24].



Figura 7: Módulo de almacenamiento térmico en hormigón sin aislamiento térmico (Stuttgart, Alemania) [24]

Tanque de termoclina

Este tipo de sistemas emplean un único tanque que contiene el fluido de almacenamiento, generalmente sales fundidas, tal como muestra la Figura 8. Durante el periodo de carga, las sales son bombeadas a la parte superior del tanque. Este volumen caliente de material, de menor densidad, se sitúa por encima del volumen frío, desplazándolo. Dicho fenómeno provoca la creación de un gradiente de temperaturas, cuya estabilidad se debe a la diferencia de densidades a distinta temperatura de los dos volúmenes. En ocasiones también se emplea material de relleno en el sistema para estabilizar el gradiente térmico y reducir la convección natural dentro del líquido. Este relleno actúa como material primario de almacenamiento

En España existen varias centrales termosolares que emplean este sistema, como la central de Puerto Errado (Murcia) o las instalaciones de prueba SSPS-DCS en Almería. Sin embargo, la tecnología más extendida a escala comercial es el sistema de dos tanques [25].

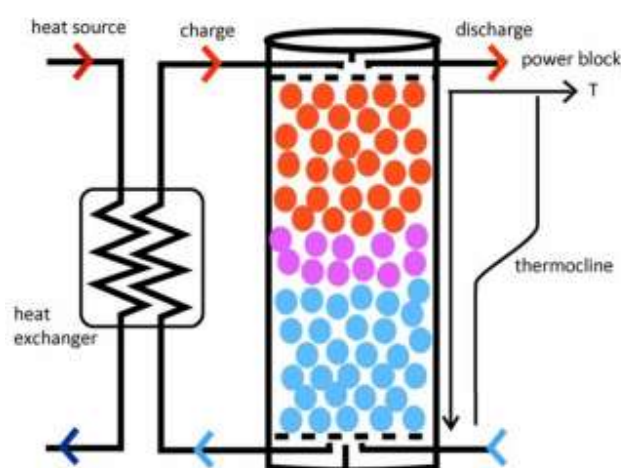


Figura 8: Sistema de almacenamiento de energía térmica de tanque de termoclina [16]

1.5.2 Calor latente

El almacenamiento por calor latente se basa en el calor absorbido o liberado cuando un material cambia de estado físico. El cambio de fase más empleado es la transformación sólido-líquido de un material. A pesar de la existencia de varios artículos que estudian esta tecnología [26], [27], es necesaria la mejora de los procesos de transferencia de calor en el medio y las superficies del sistema mediante el uso de materiales muy conductores para almacenamiento de energía térmica a alta temperatura. A baja temperatura (hasta 50°C) se emplean materiales con

cambio de fase (PCMs) en los muros de edificios para almacenar energía, optimizando el volumen necesario respecto a muros de hormigón [28]. En cuanto al almacenamiento a temperatura elevada, no existe ningún sistema a escala comercial. Las razones principales son: la dificultad de adaptar el coste del PCM para una determinada aplicación, su degradación debido a la temperatura, y su capacidad energética.

1.5.3 Calor termoquímico

Los sistemas de almacenamiento de calor termoquímico pueden basarse en dos procesos diferentes: La fijación de un gas reactivo por una sustancia condensada, llamado adsorción, o si se tratase de un líquido, absorción; o una reacción química. La energía es almacenada como potencial químico, limitando las pérdidas de calor y permitiendo una densidad de energía mayor a las anteriores [16]. En el sector del almacenamiento energético, un material con mayor densidad de energía tendrá mayor capacidad de almacenamiento por unidad de volumen.

El sistema de absorción permite el almacenamiento del calor durante los periodos de mayor actividad solar, para ser aprovechado en las condiciones opuestas. Su tecnología se basa en el bombeo de una solución durante el proceso de carga (desorción), circulando hasta el generador o desorbente. Allí es calentada por un colector solar. El absorbente en la solución puede ser desorbido endotérmicamente y transferido al condensador donde su calor latente se libera. El absorbente condensado fluye hasta el tanque donde puede ser almacenado. Durante los periodos de inactividad la existencia de dos tanques permite que la solución líquida y absorbente se conserven por separado [29]. A pesar de su gran capacidad de almacenamiento y la posibilidad de hacerlo durante largos periodos de tiempo, aún está en fase de desarrollo [30].

En cuanto al almacenamiento mediante adsorción y reacción sólido/gas, es empleado en sistemas de ventilación de los edificios. El aire procedente del exterior es calentado usando colectores solares durante el proceso de desorción. Durante la sorción, el aire húmedo es extraído del edificio y dirigido al reactor, abandonándolo para calentar el aire frío [31].

El almacenamiento térmico termoquímico a elevada temperatura ha sido estudiado empleando diferentes técnicas: ciclos redox y óxido/hidróxido mediante flujo de aire en reactores de lecho fijo, y reactores fluidificados. Sin embargo, requieren de un análisis más

detallado para la optimización de las tecnologías actuales, así como la eficiencia de los procesos termoquímicos en la concentración de energía solar [16].

1.6 Proyecto NewSOL: New Storage Latent and Sensible concept for high efficient CSP plants

El presente documento se encuentra enmarcado en el proyecto europeo NewSOL. Es un proyecto de colaboración financiado por la Comisión Europea dentro del Programa Marco H2020 (NMBP-17-2016-Advanced materials solutions and architectures for high efficiency solar energy harvesting).

En NewSOL se busca desarrollar soluciones con materiales avanzados para mejorar la eficiencia de los medios de almacenamiento de energía térmica de centrales termosolares. Para ello se validará el comportamiento de estos materiales desarrollados en prototipos con monitorización en tiempo real [32].

Los materiales avanzados y funcionalizados que se han desarrollado se aplicaran en dos elementos innovadores:

- Tanque de almacenamiento térmico (por calor sensible en hormigón y calor latente en sales inorgánicas).
- Elemento modular de hormigón (por calor sensible).

2 Objetivos

El estudio se dirige a conocer las propiedades fisicoquímicas de hormigones cuando deben operar a elevadas temperaturas. Los objetivos parciales del Trabajo de Fin de Grado son:

- **Objetivo 1:** Diseño de diferentes ensayos a elevadas temperaturas que simulen las condiciones en servicio del hormigón para el almacenamiento de energía térmica.
- **Objetivo 2:** Evaluación y diseño de un protocolo de medida de la conductividad térmica a elevada temperatura.
- **Objetivo 3:** Evaluación y diseño de un protocolo de medida de la resistencia eléctrica a elevada temperatura para el estudio de la pérdida de agua libre de la pasta de cemento durante el secado.
- **Objetivo 4:** Evaluación de la pérdida de masa debido a los procesos de deshidratación del cemento, así como su relación con la resistencia eléctrica durante el proceso de secado hasta 105°C.
- **Objetivo 5:** Integración y análisis de los procesos fisicoquímicos que sufre el hormigón a temperatura elevada con su conductividad térmica y resistencia eléctrica.

3 Estado del arte

3.1 Introducción

En la actualidad, los hormigones convencionales no permiten las condiciones en servicio que demandan las centrales termosolares en el almacenamiento de energía térmica (TES). Los factores principales que afectan al hormigón en su uso a elevadas temperaturas son: la deshidratación del cemento, la expansión térmica de los áridos y la retracción de la pasta de cemento [33]. Por tanto, es necesario el desarrollo de nuevos hormigones capaces de operar con los regímenes térmicos de operación deseados. En el caso de las centrales termosolares, el uso del hormigón puede tener como objetivo el aislamiento del tanque que contiene sales fundidas, del suelo, o bien como material para TES. La selección del tipo de cemento, adiciones minerales, áridos, su distribución de tamaños y composición, ratio cemento/agua, son aspectos clave para su desempeño en las condiciones extremas de temperatura. Las propiedades más características para este fin, son la conductividad térmica, difusividad y estabilidad fisicoquímica a ciclos térmicos. Durante su diseño se deberán tener una serie de consideraciones mecánicas y térmicas acordes a la vida en servicio del hormigón con capacidad de almacenamiento térmico: 1) alto calor específico, para simular la eficiencia de acumulación de calor, 2) alta densidad para acumular mayor calor, cantidad de energía, 3) alta conductividad térmica para mejorar la transferencia de calor en los procesos de carga y descarga térmica.

3.2 Estudios desarrollados

En la actualidad existen numerosos proyectos de investigación acerca del hormigón como almacenamiento térmico en centrales termosolares. A continuación, se muestran algunos de ellos, ordenados cronológicamente.

En 2012 D. Laing et al probó la estabilidad térmica del hormigón, sometido a más de 370 ciclos térmicos, en un rango de 200-400°C durante 23 meses. El módulo de hormigón empleado fue de 23 m³, y tenía una capacidad 1100 MWh. Fue diseñado para su operación en una planta de colectores cilindro parabólicos en la central eléctrica de Andasol [34].

En 2013, J. Emerson et al. realizaron un análisis económico de mezclas de hormigón hasta 600°C para almacenamiento térmico en centrales solares, con una temperatura de

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

operación 50% superior a los sistemas empleados hasta la fecha [19]. Utilizaron un sistema de termoclina en lugar del sistema de dos tanques, con el objetivo de abaratar costes al reducir el volumen de almacenamiento [35].

En 2015, J. M Caruncho et al. desarrollaron un estudio empleando el hormigón Heatek®, en un sistema de dos tanques de almacenamiento de energía térmica, con la peculiaridad que el tanque caliente (almacenamiento de calor) se situaba en el interior del tanque frío (aislante). Su volumen era de 235.60 m³. La optimización del diseño permitía la reducción de pérdidas y volumen requerido de HTF [36].

M. C. Alonso et al. estudiaron el comportamiento en morteros y hormigones con cemento de aluminato de calcio (CAC) mezclados con escoria de alto horno, usando áridos de distinto origen y tamaño. Se sometió a 75 ciclos de 24 horas en un rango de temperaturas de 290-550°C, para simular las condiciones del almacenamiento de energía térmica (TES) [37].

En 2017, N. Hoivik et al. presentaron un estudio basado en dos módulos de hormigón de 500 kWh cada uno. Fueron elaborados de un hormigón comercial, Heatcrete®, con una conductividad térmica mayor a la de los hormigones convencionales para optimizar la transferencia de calor. Se consiguió su estabilidad hasta 450°C, tras ciclos térmicos y más de 1000 horas de operación [38].

3.3 Evolución de los componentes del hormigón a alta temperatura

3.3.1 Pasta de cemento

En la elaboración de este proyecto se ha empleado cemento de aluminato de calcio. Se trata de un conglomerante hidráulico, que se obtiene a partir de fusión entre 1450-1550°C de mezclas óptimas de caliza y bauxita [39]. Tras este proceso, el clinker obtenido se le identifica como cemento de aluminato de calcio (CAC), que para su uso debe ser molido a tamaño polvo. En cuanto a su composición mineralógica está constituido los compuestos reflejados en la Tabla 2.

Tabla 2: Composición mineralógica del CAC [39]

Fase	Notación	Contenido (%)
Aluminato monocálcico	CA	40-50
Ferrita	C ₄ AF	10-40
Belita	β-C ₂ S	<10
Gehlenita	C ₂ AS ₂	
Heptaaluminato dodecálcico	C ₁₂ A ₇	2-5
Perovskita	CT	2-4
Wüstita	<i>f</i>	

En la notación empleada, los óxidos aparecen representados por una letra, donde: A=Al₂O₃, C=CaO, F=Fe₂O₃, *f*=FeO, S=SiO₂ y T=TiO₂.

El cemento CAC se caracteriza por la rápida evolución de su resistencia mecánica pasadas tan sólo 24 horas desde su hidratación. Este fenómeno se debe a la aparición las fases hidratadas hexagonales (CAH₁₀ y C₂AH₈), y de hidróxido de aluminio (AH₃, colloidal aluminium hydrate, generalmente en fase gibbsita). Las fases citadas son metaestables, de estructura hexagonal que se transforman lentamente (o rápidamente si la temperatura y/o la humedad catalizan el proceso) en la fase cubica C₃AH₆ y gibbsita, (AH₃), las cuales son estables [39]. El cambio de estructura hexagonal (CAH₁₀) (1.72 g/cm³) a fases cúbicas más estables (C₃AH₆), viene acompañado de una disminución de volumen y de aumento de densidad (2.53 g/cm³), durante las reacciones mencionadas. Además, se produce un incremento en la porosidad (20%) como consecuencia del cambio de volumen de los sólidos durante la conversión y por tanto un descenso en las propiedades mecánicas [40].

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

La enorme cantidad de agua requerida para la completa hidratación del cemento de alto contenido en alúmina (HAC), provoca que la pasta de cemento tienda a tener menos agua evaporable que la pasta de cemento Portland en condiciones similares de proporción en la mezcla. Calentar el CAC entre 100 y 150°C produce una pérdida rápida de agua evaporable o humedad libre [33].

Los cambios más importantes ocurren a temperaturas superiores hasta 300°C, la deshidratación del CAH_{10} y AH_3 (decahidrato de aluminato de calcio e hidróxido de aluminio). A temperaturas entre 400-500°C este proceso de deshidratación debería completarse, mientras que los cambios a alta temperatura pueden deberse a otras fases hidro-aluminio [41]. La porosidad del hormigón CAC puede aumentar hasta alrededor de un 25% por encima de 500°C [42]. Estos cambios en la densidad y la porosidad afectan la resistencia mecánica de la pasta de cemento CAC. Entre 200 y 600°C, la resistencia de la pasta de CAC decae, alrededor de un 50%. Las reacciones de deshidratación resultan en la contracción irreversible de la pasta endurecida mientras el posterior recalentamiento provoca expansión térmica. Hasta 900°C la media del coeficiente de expansión térmica es de $60 \cdot 10^{-7}$ y $80 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. A temperaturas elevadas, no ocurren cambios significativos hasta la fusión por encima de 1300°C. Además, el CAC deshidratado es más estable después del enfriamiento, reduciendo los riesgos de expansión, un aspecto crítico en el cemento Portland (OPC) [33].

3.3.2 Áridos

Los áridos ocupan aproximadamente un 70-80% del volumen total de hormigón, por lo que su influencia a temperatura elevada es significativa [33]. Su selección en la elaboración del hormigón es de gran importancia en la estabilización del daño durante los procesos de carga y descarga térmica en TES [37]. Por tanto, es interesante limitar aquellos con gran expansión térmica que derive en la degradación de la resistencia mecánica a elevadas temperaturas, así como su comportamiento frente a ciclos de fatiga térmica. Su tamaño, forma y distribución, también juegan un papel importante en las reacciones de deshidratación y expansión térmica.

3.3.3 Fibras de polipropileno

El uso de hormigón a elevadas temperaturas puede traer consigo el fenómeno de explosión, más conocido como “spalling”. Al calentar una estructura de hormigón, sufre un proceso gradual de deshidratación, en la que el vapor de agua resultante se pierde a través de los poros. Sin embargo, si el calentamiento se produce de forma acelerada, la presión ejercida por el vapor es mayor a la velocidad a la que este abandona la estructura, dañando sus capas exteriores. Debido a la alta densidad del hormigón, el agua combinada, se evapora muy despacio durante el calentamiento. La forma más habitual en la que se desarrolla este fenómeno es durante incendios de edificaciones, en los que el fuego alcanza la estructura metálica del armado de hormigón. Si se produce de forma brusca, la estructura puede llegar a explotar. Existen diversos métodos para reducir este riesgo, uno de los más aplicados es incorporar fibras de polipropileno al hormigón. De acuerdo con Kalifa et al. [46]:

“Se recomienda su uso en el hormigón para reducir el riesgo de explosión en situaciones de alta temperatura. Cuando la temperatura alcanza 165°C, las fibras se funden, y vaporizan a 350°C, creando vacíos, pensados para aliviar las tensiones internas producidas por los movimientos del vapor a altas temperaturas. Los mecanismos físicos específicos no están claros, pero su eficiencia ha sido probada en numerosas aplicaciones.”

3.4 Variación de propiedades del hormigón a alta temperatura

3.4.1 Pérdida de masa

Cuantitativamente la pérdida de masa durante el calentamiento se debe al proceso de deshidratación que sufre la pasta de cemento del hormigón hasta los 400°C. Su valor depende principalmente de dos factores, los componentes del propio hormigón (tipo de cemento, basado en OPC o en CAC) y el procedimiento de secado empleado. En ellos se incluyen otras características como la condición de curado y tiempo empleado, el tamaño y geometría de las probetas o la velocidad de calentamiento [43].

3.4.2 Contracción y expansión térmica

Como se ha comentado anteriormente, los áridos comprenden la mayor parte del volumen del hormigón, influenciando en gran medida el comportamiento térmico de este. Al someter el hormigón a elevada temperatura, los áridos son el componente más influyente en la expansión térmica, que depende de su composición mineralógica [44]. Sin embargo, la pasta de cemento sufre el proceso opuesto. Durante las reacciones de deshidratación, experimenta una contracción térmica irreversible [33]. Por tanto, la combinación de cemento y áridos en el hormigón resulta en una evolución no lineal de la expansión térmica.

Dependiendo del origen de los áridos empleados, el valor de la expansión durante el calentamiento puede ser muy variable. Los áridos silico calcáreos a 600°C, doblan el valor de expansión térmica respecto al árido calcáreo. Esto ocurre debido al mayor coeficiente de expansión térmica del árido silíceo. Además, la transformación de fase del cuarzo que ocurre a 573°C, viene acompañada de un gran incremento de volumen del árido. En estudios desarrollados por Hager (2004) y Mindeguia (2006), en el hormigón con árido silíceo se observó mayor expansión térmica, así como mayor deformación residual después del enfriamiento, resultando en un número importante de grietas visibles en la superficie de las probetas [45], [46].

3.4.3 Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica del hormigón puede describirse como la resistencia que ofrece a la transferencia de iones sometidos a un campo eléctrico. La medida de la resistencia eléctrica puede usarse para determinar el tamaño y la extensión de las interconexiones entre poros. Es una característica inherente del material, dependiente de la geometría de la muestra. La ecuación (1), describe la relación entre la resistencia (R) y resistividad (ρ), donde κ es el factor geométrico, que depende del tamaño y la forma de la muestra de hormigón, así como con la distancia entre los electrodos de medida [47].

$$\rho = \kappa \cdot R \quad (1)$$

En la práctica la resistencia eléctrica se mide directamente por medio de un ensayo, y la resistividad es calculada a partir de la ecuación (1). A pesar de que la medida de la resistencia en el hormigón parece muy simple, la complejidad de su microestructura hace difícil encontrar una técnica fiable. El hormigón es un material compuesto, poroso y dependiente del contenido de humedad, es decir, el grado de saturación de los poros. Puede mostrar propiedades conductoras o aislantes, midiendo una resistencia eléctrica muy alta cuando está seco. Sin embargo, el mismo hormigón podría tener mucha menor resistencia eléctrica en una condición de saturación. Sus propiedades capacitivas representan un obstáculo adicional, induciendo polarización en la interfaz del electrodo-hormigón y en la solución que ocupa los poros, cuando es sometido a una corriente directa. Las técnicas de medida más empleadas son el método uniaxial y el método de cuatro puntos, donde generalmente la conexión del hormigón al circuito se realiza mediante electrodos metálicos [47].

Método uniaxial

La muestra de hormigón se sitúa entre dos electrodos, normalmente placas metálicas paralelas. Se emplea una esponja húmeda que actúa como contacto en las interfases para asegurar la buena conexión eléctrica. Se aplica corriente alterna y se mide la caída de potencial entre los electrodos. La técnica uniaxial es fácil y fiable a escala de laboratorio en ensayos de control. Este tipo de ensayo no es destructivo, por lo que pueden realizarse tantas medidas como sea necesario.

Método de cuatro puntos

Mide la resistencia eléctrica de la superficie del hormigón usando cuatro electrodos. Generalmente se sitúan en línea recta e igualmente espaciados. Los dos electrodos interiores miden el potencial eléctrico creado cuando se aplica a los electrodos exteriores una corriente alterna. Se trata de un ensayo no destructivo, rápido y simple por su configuración. Ideal para la evaluación de esta propiedad in-situ. Cabe mencionar que la presencia de grietas y barras de refuerzo en el hormigón puede afectar a las medidas. A diferencia de la técnica uniaxial, las medidas son sensibles a la condición de la superficie del hormigón, incluyendo la presencia de humedad y poros. Por ello, deben realizarse múltiples medidas para el cálculo de un valor medio.

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

Para medir la resistencia eléctrica en el hormigón, es importante evaluar algunas características que influyen sobre ella de forma significativa, como el grado de saturación, la temperatura, y la presencia de grietas. Un cambio en el grado de saturación puede afectar la resistencia eléctrica del hormigón, ya que varía la cantidad de fluido en la red de poros. La temperatura actúa sobre la movilidad iónica de la solución de los poros, afectando el flujo de corriente eléctrica en el hormigón. En general, un aumento en la temperatura aumenta la movilización, lo que se traduce en una disminución de la resistencia eléctrica. Por otro lado, la presencia de grietas en la microestructura del hormigón puede cambiar las propiedades de transporte. Las grietas cambian la conectividad de la estructura de poros y por tanto las propiedades eléctricas [47].

La dependencia de la resistencia eléctrica con el contenido de humedad ha sido evaluada en otros estudios. Rajabpour et al. evaluaron la variación que se produce en la resistencia eléctrica durante el secado, debido a los cambios que experimenta la solución de los poros, su fracción volumétrica y la conectividad efectiva entre ellos. Demostraron que la corriente no fluye necesariamente por el camino más corto entre los electrodos. Comprobando que la resistencia eléctrica en las muestras está influenciada por la región de material que rodea a los electrodos y la que se encuentra entre ellos. Por lo que la resistencia eléctrica medida en una región cercana a los electrodos, muy resistiva o muy conductora, es diferente a la resistencia eléctrica real [48]. Por otro lado, Whittington et al. estudiaron la dependencia de la resistencia eléctrica con la relación agua/cemento. Al aumentar la relación agua /cemento, se produce una disminución de la resistividad. Con muestras fabricadas únicamente de pasta de cemento, se demostró que la resistencia eléctrica del hormigón sigue la misma tendencia, aunque con unos valores varias unidades superiores [49].

3.4.4 Conductividad térmica

La conductividad térmica es la variación del flujo de calor a través de un cuerpo de área y espesor igual a la unidad entre dos superficies con una diferencia de temperatura de 1°C [43]. Actualmente no existe un método estandarizado de medida a elevada temperatura. Sin embargo, debido al contenido de humedad del hormigón por debajo de 150°C , su medida puede verse

afectada arrojando un valor menor al real. Por tanto, algunos autores recomiendan el uso de métodos transitorios como el hilo caliente, empleado también en el presente trabajo [50].

Alguno de los parámetros que influyen notablemente en la conductividad térmica son: el tipo de árido, su volumen, la relación agua/cemento, y el contenido de humedad. Los áridos provenientes del sílice y cuarzo muestran los valores más altos de conductividad, mientras que el basalto tiene un valor mucho menor [51]. La densidad del cemento también es una característica de interés, ya que su conductividad térmica es mayor que la del agua o el aire. Si se mantiene la relación de cemento/áridos, y se reduce la relación agua/cemento la conductividad térmica aumenta [52]. Adicionalmente, Toman y Cerny, realizaron un estudio acerca del contenido de humedad, confirmando que la conductividad térmica aumentaba entre 0.3-0.4 W/m·K entre las muestras secas y saturadas de hormigón [53].

En cuanto a los valores de conductividad térmica obtenidos en los proyectos que han desarrollado prototipos de sistemas de almacenamiento de energía térmica empleando hormigón, se encuentran: D. Laing et al. (1.45 W/m·K a 25°C y 1.20 W/m·K a 400°C) [34], J. Emerson et al. (1.65-2.41 W/m·K en 26 muestras de diferente composición) [19], J. M. Caruncho et al. (19 W/m·K en el tanque para almacenamiento de calor y 0.95 W/m·K en el tanque aislante) [36], M. C. Alonso et al. (2.05 a 25°C y 1.16 W/m·K tras ciclos) [37] y N. Hoivik et al. (2.4 W/m·K a 25°C y 1.6 W/m·K a 450°C) [38].

4 Campaña experimental

4.1 Caracterización de cemento y áridos

Para la elaboración de este proyecto se fabricaron dos tipos de morteros equivalentes al hormigón tipo diseñado para una aplicación termosolar, empleando cemento de aluminato de calcio y distintos tipos de árido. El CAC se utiliza generalmente en aplicaciones refractarias y se caracteriza por su corto tiempo de fraguado y rápido endurecimiento. Los áridos fueron seleccionados con el objetivo de mitigar los daños en el hormigón durante los procesos de carga y descarga térmica.

Cemento de aluminato de calcio (CAC)

Es obtenido a partir de la mezcla óptima de caliza, bauxita e impurezas de óxido de hierro (Fe_2O_3), dióxido de titanio (TiO_2) y dióxido de sílice (SiO_2) [54]. La composición química de un cemento típico CAC es la que se incluye en la Tabla 13.

Tabla 13: Composición química del cemento CAC en %

%	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	FeO	SiO_2	Cl	S_2	SO_3	Álcalis
CAC	41.5	38	10.5	4.5	3	0.01	0.05	0.1	0.1

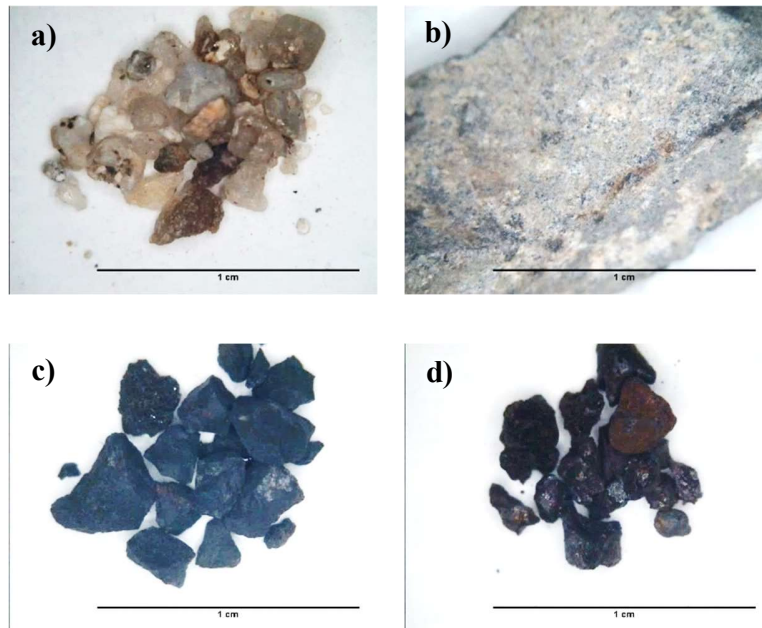
Áridos

Se emplearon cuatro tipos de árido diferentes: basalto, CAT, silíceo y escoria denominada alentejo. Todos ellos tienen un tamaño inferior a 3 mm (Tabla 4), sin embargo, el alentejo también se incluyó un tamaño superior, 3-7 mm. Respecto al CAT, es un árido sintético basado en aluminatos de calcio. El árido silíceo tiene un tamaño más redondeado debido al proceso de erosión natural, mientras que el basalto tiene un tamaño visiblemente mayor. En cuanto al alentejo, cabe mencionar que se trata de un árido procedente del residuo de la mina de São Domingos en la región portuguesa del Alentejo, y posee residuos de óxido de hierro. La selección de áridos viene determinada por la elevada conductividad térmica del árido silíceo.

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

Mientras que la combinación de basalto, CAT y alentejo se caracterizan por su baja conductividad térmica y baja expansión térmica, denominándolo ternario.

Tabla 4: a) Arena de sílice; b) Arena de basalto c) CAT; d) Alentejo < 3 mm



4.2 Dosificaciones

Se fabricaron dos dosificaciones distintas en las cuales la relación agua/cemento fue idéntica, Tabla 5. Se añadieron fibras de polipropileno y un aditivo superplastificante para mejorar la trabajabilidad de los morteros.

Tabla 5: Dosificaciones de los distintos morteros ensayados expresadas en kg/m³

Componentes (kg/m³)	Morteros	
	Ternario	Silícico
Cemento CAC	600	600
Agua	258	258
Superplastificante	0.9	0.9
Arena 1-Basalto < 3 mm	691	-
Arena 2-CAT < 3 mm	745	
Arena 3-Silícico < 3 mm	-	1456.4
Arena 4-Alentejo < 3 mm	133	-
Arena 5-Alentejo 2-7 mm	141	-
Fibras PP	2	-
Agua/cemento: a/c	0.43	0.43
Cemento/árido: c/a	0.35	0.41

4.3 Fabricación de las probetas

Para la elaboración de las probetas de mortero, se emplearon los moldes standard de acero, de 4x4x16 cm. Se realizaron 8 probetas para cada tipo de material en estudio. La distribución de las probetas fue: cuatro para registro de temperatura, dos para resistencia eléctrica y dos para ensayo de roturas. En las probetas destinadas a medir la temperatura, se situó un termopar tipo K, colocado en el centro de la probeta prismática, a 2 cm del lateral y 8 cm de los extremos, con

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

una profundidad de 2 cm. Con ayuda de bridas y una barra de acero se ajustó la posición (Figura 15-izquierda). Para la medida de resistencia eléctrica, se usaron dos mallas metálicas situadas a 4 cm de los extremos, y embebidas en la probeta (Figura 15-central). Las probetas resultantes tienen el aspecto mostrado en la Figura 15-derecha.



Figura 9: a) Molde para la medida de temperatura, b) Molde para la medida de Resistencia eléctrica, c) Probetas con termopar y mallas metálicas embebidas

4.3.1 Amasado

Se pesaron todos los componentes de las probetas descritos en la Tabla 5. En primer lugar, el cemento y los áridos se incorporaron a la cubeta de amasado, realizándose un mezclado inicial en seco con la ayuda de una amasadora eléctrica. Seguidamente, se añadió el agua y el superplastificante lentamente. Tras esto, se incorporaron las fibras de polipropileno, de tal forma que se consiguiera una distribución uniforme. Una vez obtenida una mezcla homogénea, se procedió a verter el mortero en los moldes, y a su compactado. Finalmente se cubrieron con un film transparente para evitar la evaporación del agua durante el fraguado. Pasadas 24 horas se procedió a desmoldar para llevar las probetas a la cámara de curado. Allí permanecerían en unas condiciones constantes de 98% de humedad relativa y 20°C de temperatura, durante 7 días. Una vez finalizado el proceso de curado de las distintas probetas, fueron sometidas a una serie de ensayos mecánicos. Estos consisten en un ensayo a flexión, y dos ensayos a compresión,

mediante los cuales se asegura que el mortero tenga unas propiedades mecánicas dentro del rango de valores de este material.

4.4 Propiedades térmicas y metodología

Tras el curado se procedió al estudio del comportamiento a elevada temperatura, mediante la elaboración de distintos ensayos.

Se realizaron dos ensayos distintos hasta 105°C, con el objetivo de estudiar el proceso de pérdida de agua libre en el hormigón, registrando los valores de resistencia eléctrica, conductividad térmica y pérdida de masa. Y, en segundo lugar, un ensayo en el que el hormigón es calentado hasta 600°C y sometido a procesos de fatiga térmica. De este modo, se simuló las condiciones en servicio de su uso en sistemas de almacenamiento de energía térmica, y se registraron las propiedades anteriormente mencionadas.

4.4.1 Conductividad térmica

Para la elaboración de este ensayo se empleó el equipo QTM-700 (Kyoto Electronics) que permite la medida de conductividad térmica tanto a alta como baja temperatura, haciendo uso de dos sondas distintas. Este equipo está basado en el método del hilo caliente.

Como se ha comentado anteriormente, se utilizaron dos probetas para este ensayo, una con mallas metálicas y otra con un termopar tipo K. Su disposición en el interior del horno a la hora de tomar datos a elevada temperatura se basa en situarlas una sobre otra, colocando entre las superficies de contacto el hilo caliente. Debe asegurarse que el hilo se encuentre perfectamente fijo en dicha posición, para lo cual se utilizaron probetas adicionales a modo de peso (Figura 10).

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

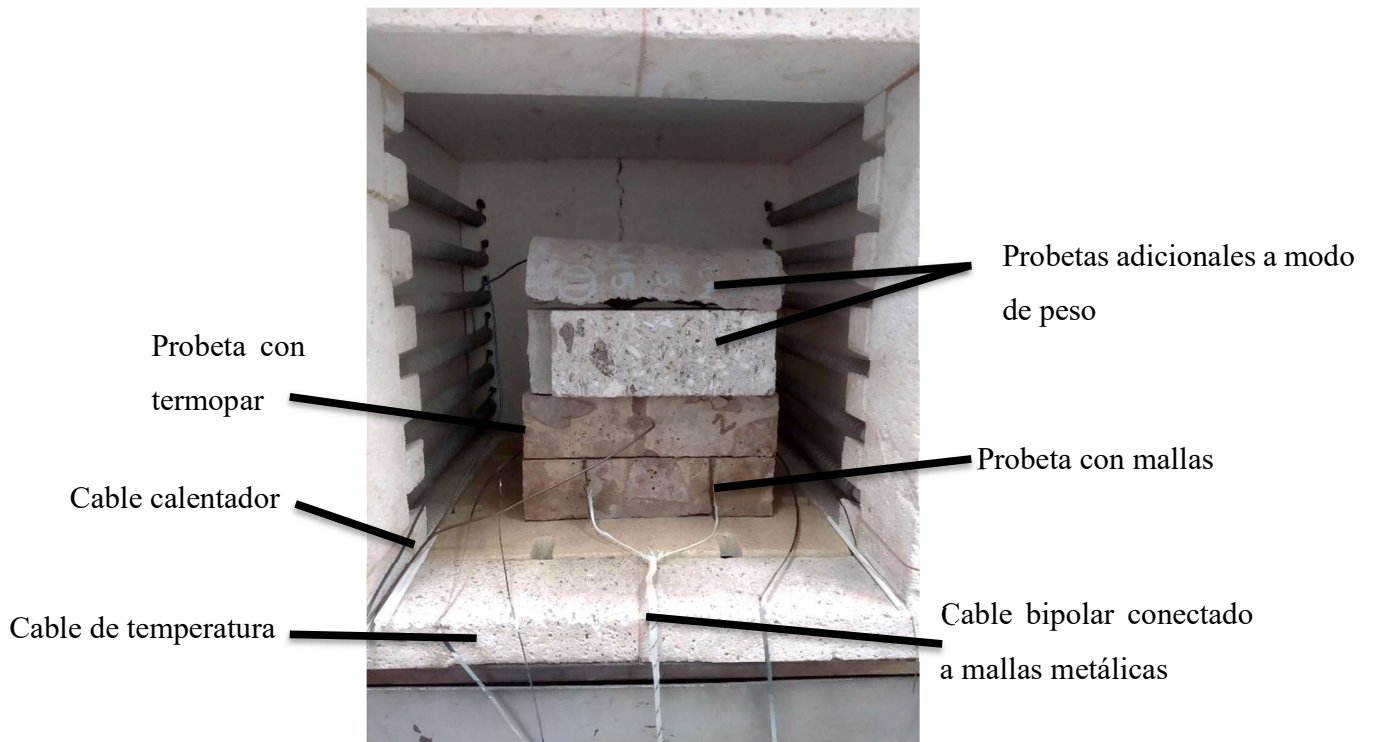


Figura 10: Montaje del ensayo de conductividad térmica en el interior del horno

Una vez colocadas las probetas en el interior del horno, se procede a realizar las conexiones. El hilo caliente se compone de la unión de dos cables distintos, uno por el que circula la corriente o calentador y otro que actúa como termopar para el registro de la temperatura. La medida de conductividad térmica es un proceso semiautomático donde el propio equipo aplica una corriente a través del cable calentador (2-3 A), mediante la cual consigue aumentar su temperatura (Efecto Joule). El terminal muestra durante este proceso el trazado de una curva, representando la temperatura y el tiempo, que describe un comportamiento logarítmico. En el caso de la toma de medidas a temperatura ambiente se hizo uso de una sonda diferente, específica para esas condiciones, aunque basada en el mismo principio.

Protocolo

Ante la inexistencia de un protocolo definido, se elaboró uno para la medida de conductividad térmica a alta temperatura y ciclos térmicos. El estudio del hormigón a elevadas temperaturas trae consigo una serie de dificultades que se mencionan a continuación.

Por un lado, es necesario que la probeta de hormigón alcance un valor de temperatura constante para comenzar a realizar las medidas. Esto se debe a que la probeta tarda más tiempo en alcanzar una determinada temperatura que el propio horno debido a la inercia térmica del material. Por otro lado, la dispersión de resultados obtenidos en ensayos en estas condiciones es elevada, ya sea por el hecho de las elevadas temperaturas, sensibilidad del equipo o la dificultad de alcanzar una temperatura constante. Para solucionar estos inconvenientes se estableció el número de medidas a tomar en cada escalón térmico, de al menos diez. Además, se realizó un análisis de las curvas tiempo-temperatura tomadas por el equipo en cada medida. Así se pudo descartar aquellas que presentaban alteraciones debido a vibraciones u otros fenómenos derivados del funcionamiento del horno.

4.4.2 Resistencia eléctrica

Actualmente, no existe un protocolo definido para la medida de resistencia eléctrica a alta temperatura. Para ello, se elaboró un ensayo que consistía en el uso de un cable bipolar conectado directamente a las mallas embebidas en la probeta (Figura 10). El otro extremo del cable se conectó a la tarjeta de adquisición de un data logger (Agilent 34970A). De este modo se pudo obtener el valor, expresado en ohmios, de su resistencia eléctrica.

4.4.3 Pérdida de masa

Para el cálculo de la pérdida de masa, se evaluó la variación de masa que pierden las probetas desde que abandonan la cámara climática (m_1) tras un proceso de curado de 7 días, hasta la finalización del ensayo hasta 600°C (m_2). En el caso de los ensayos hasta 105°C, se midió su evolución coincidiendo con el momento de medición de conductividad térmica.

$$\text{Pérdida de masa}(\%) = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \cdot 100 \quad (2)$$

4.5 Ensayos realizados

Para el estudio de la variación de propiedades termo-físicas que sufre el hormigón en servicio, se han diseñado una serie de ensayos específicos. Por un lado, sometido hasta 105 °C, pasando por varias etapas de calentamiento, rango en el que tiene lugar la evaporación del agua libre en el hormigón. Por otro lado, su exposición hasta 600 °C, temperatura máxima en servicio, y procesos de fatiga térmica, con el objetivo de simular los procesos de carga y descarga de energía térmica en su uso como tanque de almacenamiento. Los ensayos realizados y los morteros empleados en cada caso se resumen en la Tabla 6, señalando con “x” si se ha llevado a cabo dicho ensayo y “-” en el caso opuesto. Cada uno de ellos se realizó de acuerdo a un objetivo. Debido a las diferencias entre los tipos de áridos empleados, es de gran interés realizar una comparación entre la evolución de la conductividad térmica entre ellos. Y de este modo, poder determinar el tipo de almacenamiento de energía térmica óptimo para cada tipo de mortero. Por otro lado, la medida de la pérdida de masa y resistencia eléctrica se realizó para determinar la posible relación existente entre ambas magnitudes. En el uso de estructuras de grandes dimensiones de hormigón sometidas a elevada temperatura, es de gran interés la determinación del fin del proceso de secado, para evitar posibles riesgos de spalling a elevada temperatura.

Tabla 6: Ensayos realizados

Mortero	Fecha de fabricación	Curado (días)	Pérdida de masa		Conductividad térmica (W/m·K)	Resistencia eléctrica (Ω)
			Secado	Deshidratación y ciclos térmicos		
Ternario	1	22/10/18	105	x	x	-
	2	22/10/18	112	x	x	-
	3	28/03/19	11	x	x	x
	4	28/02/19	11	x	-	x
	5	28/02/19	32	x	-	x
Silícico	1	22/10/18	98	x	x	-
	2	22/10/18	206	x	-	x

4.5.1 Estudio del proceso de secado (20- 105°C)

Estos ensayos están focalizados principalmente en el estudio de la pérdida de agua libre presente en el hormigón, y cómo esta afecta a su resistencia eléctrica. El agua que contienen los poros de la pasta de cemento se evapora durante este periodo. En el secado-1: Figura 11 (izquierda), se procedió a medir la pérdida de masa durante 4 días consecutivos a 105°C. Finalmente se realizó un enfriamiento libre hasta temperatura ambiente en el interior del horno. En el secado-2, se dividió el proceso de calentamiento hasta 105°C en 3 escalones de 25°C. El tiempo de permanencia a 50 y 75°C fue de 24 horas. Una vez fueron alcanzados los 105°C, se mantuvo dicha temperatura durante 3 días, y posteriormente se enfrió libremente hasta temperatura ambiente en el interior del horno. Durante este ensayo también se examinó la

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

evolución de la conductividad térmica, medida en los puntos señalados en la Figura 11 (derecha).

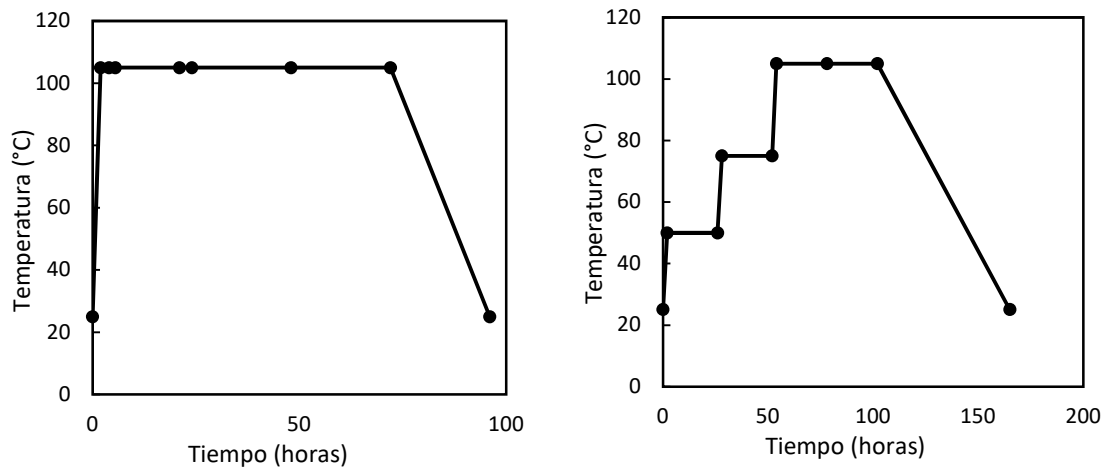


Figura 11: Evolución de la temperatura durante los ensayos de secado 1 (izquierda) y 2 (derecha)

4.5.2 Estudios de los procesos de deshidratación y ciclos térmicos (105-600°C) a alta temperatura.

El ensayo realizado hasta 600°C está basado en los procesos de deshidratación de la pasta de cemento y fatiga térmica a los que es sometido el hormigón en su uso como tanque de almacenamiento de energía térmica en centrales termosolares. El hormigón se vio sometido a ciclos de temperatura que simulan los procesos de carga y descarga térmica en el almacenamiento de sales fundidas entre 300-550°C. A continuación, se describen las etapas del ensayo y su relación con los cambios producidos en el hormigón.

Etapas 1: Calentamiento desde 105 hasta 600°C. Comprende dos fases:

1) Deshidratación de la pasta de cemento, definida entre 105-300°C. Se estableció una velocidad de calentamiento de 1°C/min, con tiempos de permanencia de 1 hora en escalones térmicos cada 100°C, representados en la Figura 12. Durante esta fase se estudió el proceso gradual de deshidratación hasta los 300°C, caracterizado por la

pérdida del agua químicamente combinada de los aluminatos hidratados, transformación que debería ser completa entre 400-500°C.

2) Calentamiento hasta 600°C. Las probetas continúan con su proceso de calentamiento hasta la temperatura fijada con una velocidad idéntica a la fase anterior, 1°C/min. Durante este periodo no ocurren cambios significativos en el hormigón.

Etapas 2: Ciclos térmicos entre 300-600°C. se llevaron a cabo procesos de enfriamiento y calentamiento, definidos como fatiga térmica. Las probetas son enfriadas hasta 300°C, manteniendo una velocidad de 1°C/min. Se realizaron medidas durante los escalones térmicos de una hora de duración, separados 100°C entre sí, (600-500-400 y 300°C). Seguidamente se calientan de nuevo hasta 600°C, y se enfrían hasta 400°C, siguiendo un protocolo idéntico a la etapa de calentamiento.

Se realizó un enfriamiento, dividido en dos etapas de pendiente diferente a las etapas anteriores. En primer lugar, se reduce la temperatura hasta 400°C, y tras esto hasta 200°C con una velocidad de 2°C/min. Finalmente, se deja enfriar libremente las probetas hasta temperatura ambiente en el interior del horno, periodo representado como una curva en la Figura 12.

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

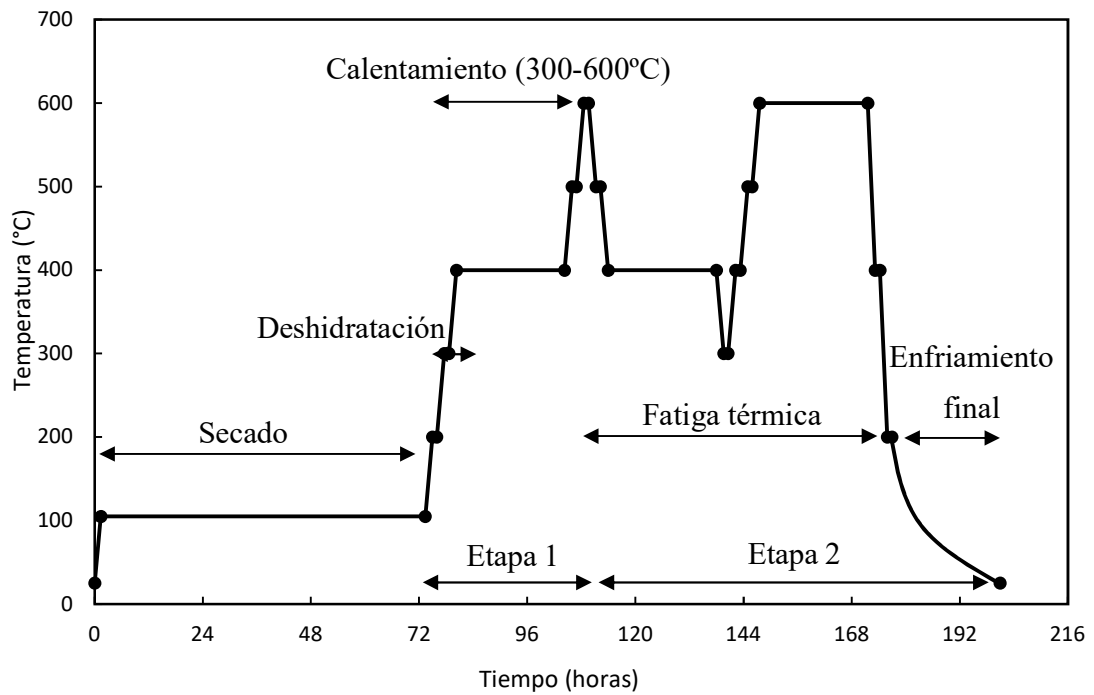


Figura 12: Evolución de la temperatura en el estudio de los procesos de deshidratación y ciclos térmicos a alta temperatura

5 Análisis de resultados

5.1 Cambios fisicoquímicos del hormigón durante el secado (25-105°C)

5.1.1 Pérdida de masa (agua libre de los poros)

Se evaluó la evolución de la pérdida de masa durante el secado-1, empleando los morteros ternario-4 y silícico-2, representados en la Figura 13. Ambas curvas siguen una tendencia muy similar, debido a que la temperatura en ambos casos ha seguido una evolución idéntica, Figura 11 (izquierda). La estabilización en la pérdida de masa de ambos morteros tiene lugar tras 24 horas sometidos a 105°C, período durante el cual se produce la completa evaporación del agua libre del cemento. Sin embargo, los valores de pérdida de masa tras la finalización del ensayo difieren entre sí, siendo 3.76 y 5.80% respectivamente. Esta variación es causada por el tipo de mortero y madurez del mismo (tiempo desde su fabricación). El árido silícico tiene una gran conductividad térmica respecto a la selección de áridos que forman el mortero ternario (basalto, CAT, alentejo), lo cual favorece los mecanismos de transferencia de calor por conducción. Es decir, el agua libre presente en los poros aumenta de temperatura con mayor rapidez, provocando una pérdida de masa mayor a tiempos idénticos de exposición al mismo flujo de calor. Este efecto podría verse potenciado por el estado inicial de las probetas, ya que sus tiempos de curado fueron muy dispares. La probeta de mortero ternario-4 fue sometida a un proceso de curado durante 11 días, mientras que el mortero silícico-2 permaneció en esas mismas condiciones durante 206 días. El grado de hidratación del cemento es diferente, resultando en un contenido de agua libre mayor en el caso del mortero silícico-2.

Análisis de la variación de propiedades termofísicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

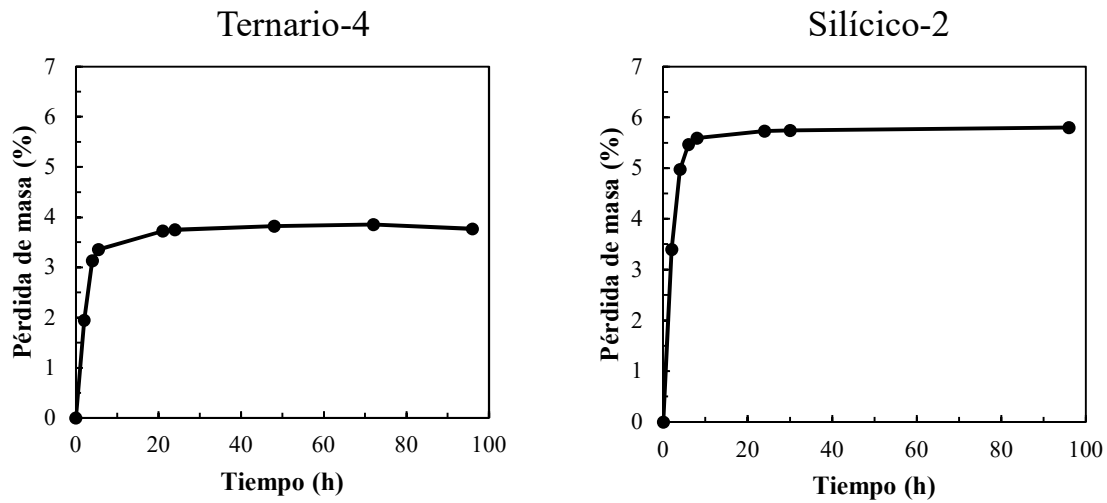


Figura 13: Evolución de la pérdida de masa durante el secado-1 del mortero ternario-4 (derecha) y silícico-2

La probeta realizada con mortero ternario-5 fue sometida a un proceso de secado diferente al anterior, secado-2: Figura 11 (derecha). El aspecto más relevante respecto a los morteros anteriores es la pendiente menos pronunciada, siguiendo una evolución más gradual, Figura 14. Este comportamiento se debe a que el calentamiento hasta 105°C, se realizó en escalones de 25°C, permitiendo la evaporación del agua libre más lentamente. Tras 24 horas sometida a 50°C la pérdida de masa es de 1.08%, lo que supone aproximadamente la mitad respecto a su valor al finalizar el secado, 2.36%. Mientras que a 75°C tiene un valor de 1.85%, alrededor de $\frac{3}{4}$ partes del total. Es necesario un periodo de 4 días para que se produzca la pérdida total de agua libre, es decir, que la estabilización de la pérdida de masa no se produce hasta 24 horas sometido a 105°C, al igual que durante el secado-1. Las diferencias en el contenido en

agua en los poros varia con la edad de madurez de la probeta, 32 días en la ternario-5 frente a 11 en la ternario -4, lo que confirma la hipótesis propuesta en la Figura 13.

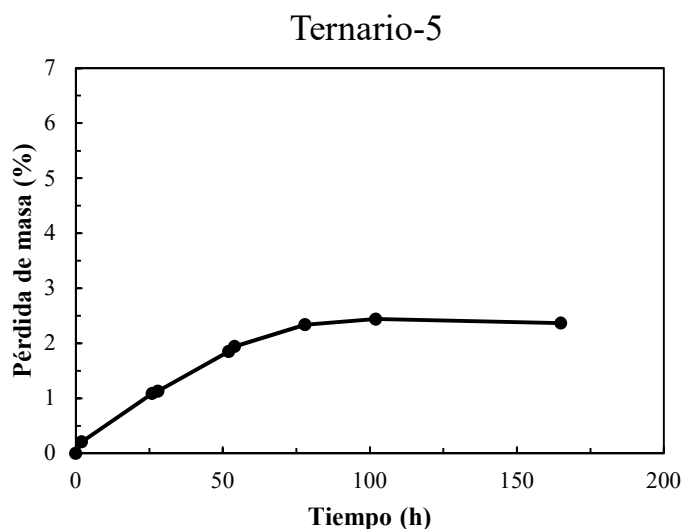


Figura 14: Evolución de la pérdida de masa durante el secado-2 del mortero ternario-5

5.1.2 Conductividad térmica

Se estudió la evolución de la conductividad térmica durante el secado-2 empleando el mortero ternario-5, Figura 15. Las medidas se realizaron en escalones de 25°C hasta 105°C, mostrando unos valores sensiblemente decrecientes. Este rango de temperaturas está caracterizado por la pérdida progresiva de agua libre de la pasta de cemento, cuya estructura porosa se llena, en su lugar, del vapor generado. La diferencia de conductividad térmica del agua en fase vapor (0.024 W/m·K), es menor que la del agua líquida (0.58 W/m·K) [55], por lo que la conductividad térmica del mortero decrece. La variación de la conductividad térmica entre el mortero seco y en estado de saturación es de alrededor de 0.2 W/m·K. La dispersión de resultados se debe la propia anisotropía del mortero, y la dificultad de operación a elevada temperatura, por lo que se realizaron 10 medidas en cada escalón térmico, como se comenta en el apartado de conductividad térmica de la campaña experimental.

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

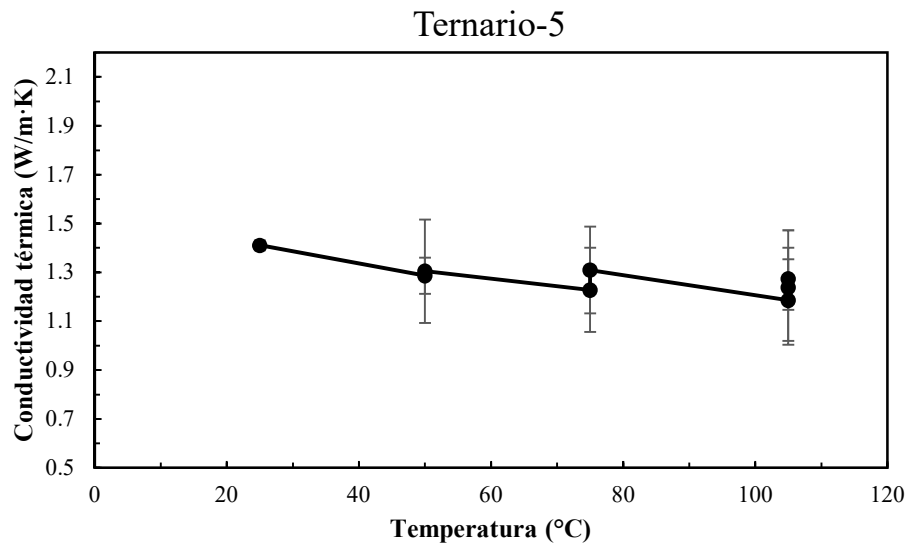


Figura 15: Evolución de la conductividad térmica durante el secado-1 del mortero ternario-5

Los valores de conductividad térmica de los morteros-1, 2, 3 y silícico-1 (tiempos de curado entre 11 y 100 días), aparecen en la Figura 16, donde el cambio más apreciable sucede en el valor arrojado por el mortero silícico-1, con un valor de 4.68 frente a 1.96 W/m·K a 25 y 105°C respectivamente. Por su parte, en los morteros ternarios se obtuvieron valores de conductividad del orden de 1 W/m·K a 105°C, excepto en el caso del mortero ternario-3, que aumentó sensiblemente (mortero con menor maduración de los ensayados en esta fase, 11 días, y por tanto con mayor agua libre esperable en sus poros). La gran variación entre mortero silícico y ternario se debe principalmente al árido empleado, puesto que el resto de los componentes se encuentran en las mismas proporciones. El árido silícico está dotado de una conductividad térmica mayor que la selección de áridos empleados en el mortero ternario (basalto, alentejo y CAT), por lo que el tipo de árido podría ser el factor más influyente en la conductividad térmica a temperatura ambiente.

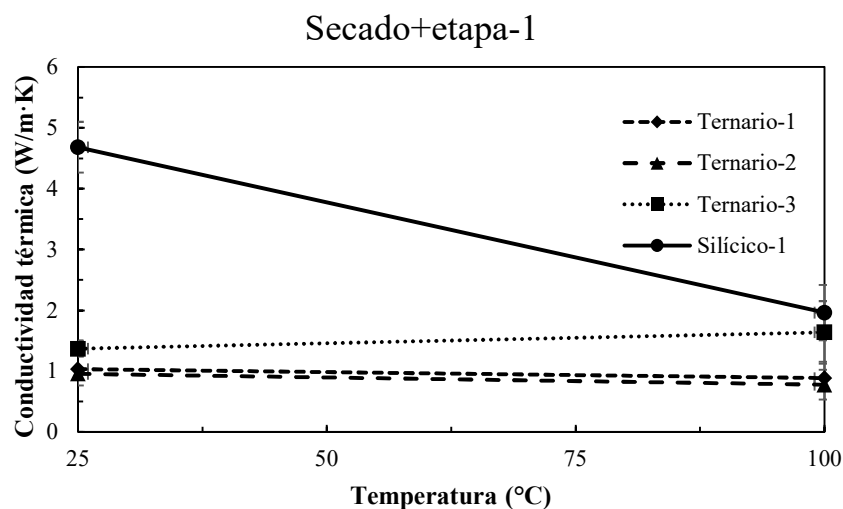


Figura 16: Evolución de la conductividad térmica durante el secado (1°C/min) hasta 105°C de los morteros ternario-1, 2, 3 y silícico-1

5.1.3 Resistencia eléctrica

La medida de la resistencia eléctrica se limitó exclusivamente al proceso de secado. El equipo empleado para su estudio no permitió realizar medidas superiores a $1 \times 10^9 \Omega$, por lo que la rápida evolución que experimenta al aumentar la temperatura aparece representada en las 10-15 primeras horas de cada ensayo.

En la Figura 17 se ha representado en escala logarítmica la resistencia eléctrica perteneciente al secado-1 del mortero ternario-3 y la evolución de la temperatura del interior de la probeta. A temperatura ambiente se registró un valor de $2.28 \times 10^5 \Omega$, y una vez alcanzados los 100°C en el interior de la probeta, la resistencia eléctrica aumentó hasta alejarse del rango de medida. Sin embargo, durante el calentamiento disminuyó hasta un mínimo de $4.89 \times 10^4 \Omega$ en torno a las 2.5 horas, probablemente como consecuencia del aumento de conductividad de la fase acuosa con la temperatura, momento que coincide con la estabilización de la temperatura en el interior de la probeta a 100°C.

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

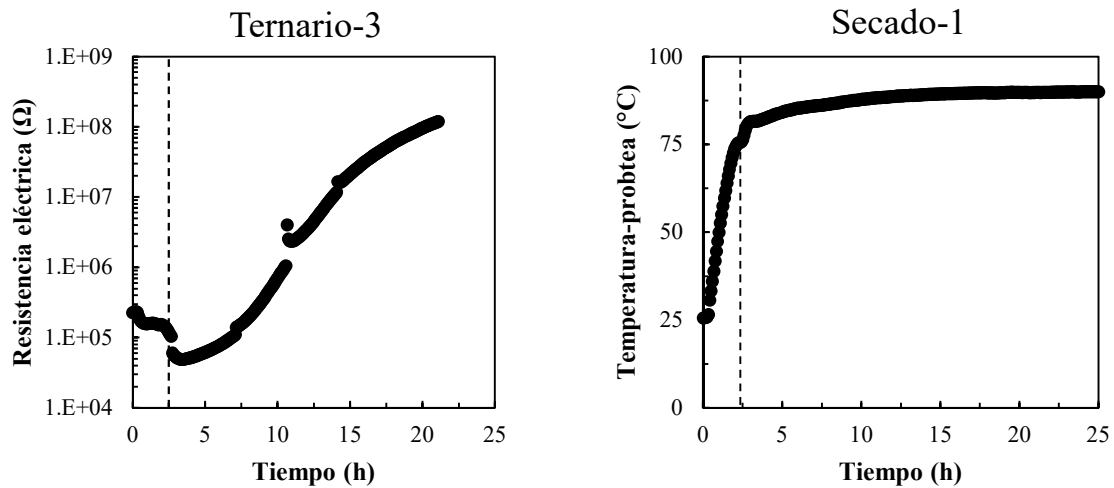


Figura 17: Evolución de la resistencia eléctrica durante el secado-1 del mortero ternario-3

Los morteros ternario-4 y silícico-2 fueron sometidos al secado-1, para la medida de resistencia eléctrica, representados en la Figura 18. El mortero silícico-2 experimentó un aumento de la resistencia eléctrica durante un tiempo mayor que el ternario-4. Este comportamiento se debe a que la pérdida de agua libre del mortero ternario-4 es menor a la del silícico-2 de acuerdo con la Figura 13, y además tiene lugar durante un menor periodo de tiempo. Adicionalmente, el mortero silícico-2 mostró un valor de resistencia eléctrica a temperatura ambiente superior respecto al mortero ternario-4, 3.54×10^5 y $1.96 \times 10^5 \Omega$ respectivamente.

En cuanto al mortero ternario-3 y 4, Figura 17 (derecha) y Figura 18 (derecha), mostraron comportamientos diferentes a pesar de ser sometidos al mismo proceso de secado y tener una dosificación idéntica. El aumento de la resistencia eléctrica del mortero ternario-3, ocurrió en un periodo de tiempo superior (20 horas), frente al ternario-4 (8.5 horas). Estos valores se deben a la propia disposición de las probetas en el interior del horno, donde el ternario-3 se situó como aparece en la Figura 10, mientras que el ternario-4 constaba tan solo de una probeta conectada al equipo de medida. Por ello, las superficies expuestas al calor fueron distintas, siendo el ternario-4 la probeta con mayor área de intercambio. La disposición

empleada en cada caso influye de este modo, en la velocidad a la que el agua ocluida dentro de los poros se evacúa hacia el exterior, y por consiguiente a la evolución de la resistencia eléctrica.

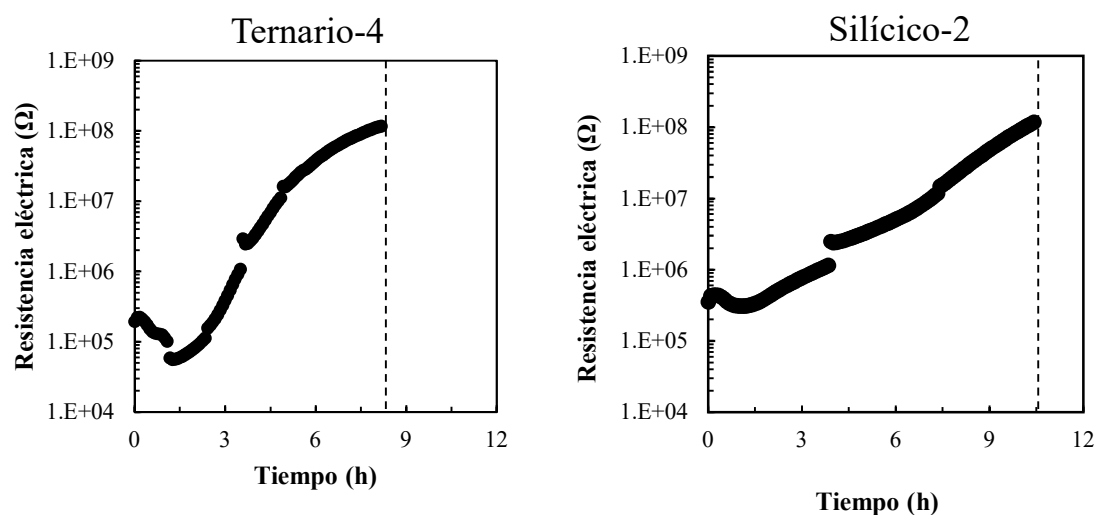


Figura 18: Evolución de la resistencia eléctrica durante el secado-1 de los morteros ternario-4 y silícico-2

La medida de resistencia eléctrica en el mortero ternario-5 se evaluó siguiendo el proceso de secado-2, y obteniendo la Figura 19. Su pendiente sigue una evolución más gradual respecto a los morteros de la Figura 18, asemejándose a la obtenida durante el secado del mortero ternario-3:Figura 17. Analizando los distintos tramos de la curva, puede observarse que la pendiente inicial es mayor que en el resto de las etapas ($\alpha > \beta > \gamma$). Esto significa que la pérdida de agua libre se produce a mayor velocidad en los primeros instantes del ensayo, coincidiendo a su vez, con los valores de pérdida de masa de la Figura 14.

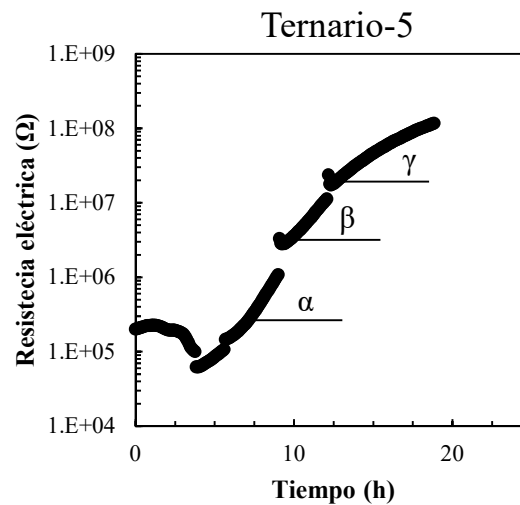


Figura 19: Evolución de la resistencia eléctrica durante el secado-2 del mortero ternario-5

5.1.4 Resistencia eléctrica y pérdida de masa

La determinación del fin del proceso de secado del hormigón es de gran importancia en aplicaciones a elevadas temperaturas para evitar el riesgo de spalling. Mediante el estudio de la resistencia eléctrica y pérdida de masa representado en la Figura 20, se determinó el momento en el que los morteros alcanzan un valor de resistencia eléctrica superior a $1 \times 10^9 \Omega$. En el caso del mortero ternario-4 y silíceo-2 dicho punto coincide con aproximadamente la completa pérdida de agua libre en la pasta de cemento, con un error del 10.9 y 3.6% respectivamente. Si se dividen las curvas obtenidas en los tramos I y II se puede observar que existe gran diferencia en la evolución de la resistencia eléctrica entre ambos, mientras que la pérdida de masa parcial es aproximadamente idéntica en cada tramo. El tramo I se caracteriza por una leve pérdida de la resistencia eléctrica, que se corresponde con el proceso de calentamiento hasta 105°C y la estabilización de la temperatura en el interior de la probeta. Durante el tramo II, la resistencia eléctrica aumenta drásticamente hasta abandonar el rango de medida, una vez la temperatura del interior de la probeta se ha estabilizado a 105°C , y pierde el resto de agua libre. Por tanto, la medida de la resistencia eléctrica es un método válido para determinación del secado del mortero.

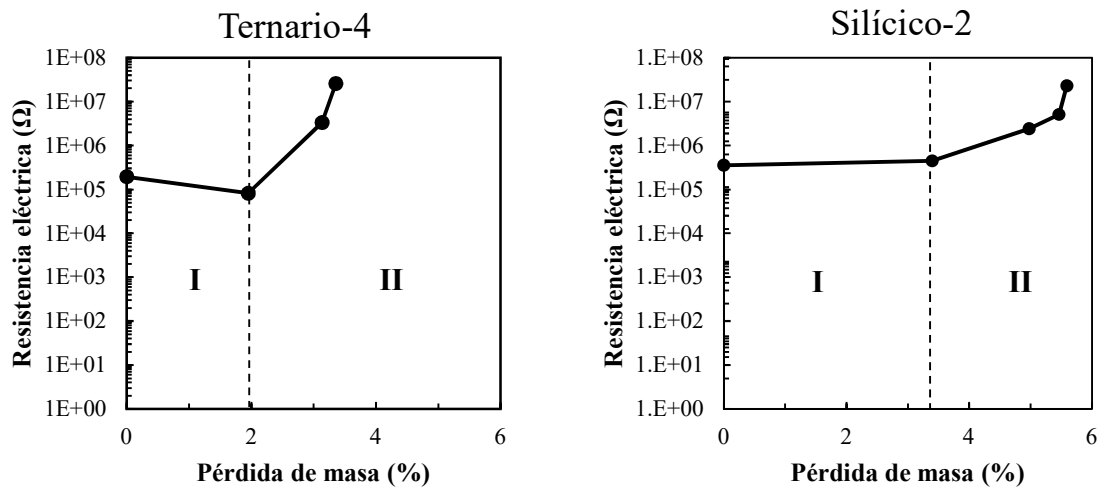


Figura 20: Evolución de la resistencia eléctrica y pérdida de masa durante el secado-1

5.2 Proceso de deshidratación y calentamiento del hormigón hasta 600°C

5.2.1 Pérdida de masa

Se determinó la pérdida de masa total de los diferentes morteros representados en la Figura 21 tras ser sometidos a ciclos de fatiga térmica hasta 600°C. Los valores obtenidos en el caso de los morteros ternarios-1 y 2, y silícico-1 son similares. Dichos valores podrían deberse al tiempo de curado de las probetas, de 105, 112 y 98 días respectivamente. El mayor número de días respecto al mortero ternario-3 (11 días), habría resultado en una mayor cantidad de agua libre en la pasta de cemento. Esta humedad es eliminada de forma gradual durante el secado hasta 105°C, resultando en una pérdida de masa mayor. Respecto al valor de la pérdida de masa en el mortero silícico-1, es ligeramente superior al resto. Las diferencias pueden bien justificarse por la mayor relación cemento/árido en el silícico-1, como se deduce de la Tabla 5, dando lugar a un mayor volumen de pasta respecto al árido ternario-1, 2 y 3.

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

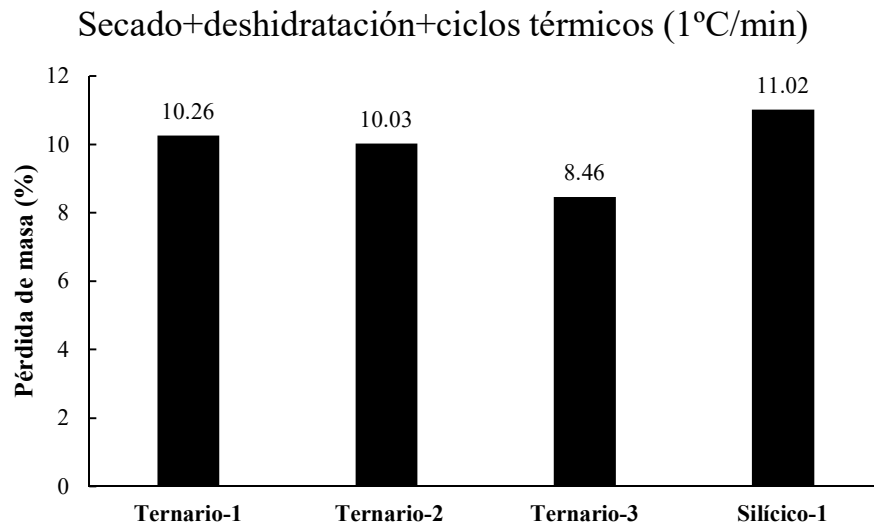


Figura 21: Pérdida de masa de los morteros tras secado, deshidratación y ciclos de fatiga térmica

Adicionalmente, se midió la pérdida de masa en el mortero ternario-3 a cada una de las temperaturas durante el secado, deshidratación y ciclos de fatiga, representado en la Figura 22. Se puede observar con claridad que la pérdida de masa más relevante se produce en dos intervalos de temperatura concretos. El primero (I) tiene lugar durante las primeras horas de secado hasta 105°C donde se alcanza un 4% de pérdida de masa derivada de la evaporación del agua libre en la pasta de cemento. El segundo (II) se da en torno a las 75 horas, coincidiendo con el intervalo de temperaturas 200-300°C, en el que se producen las reacciones de deshidratación del cemento, con la pérdida del agua químicamente combinada. A partir de las 100 horas se produce el calentamiento restante hasta 600°C y posteriormente los ciclos de fatiga térmica. Durante este periodo, la pérdida de masa presenta una desviación de 0.15%, por lo que puede asumirse que la masa permanece constante.

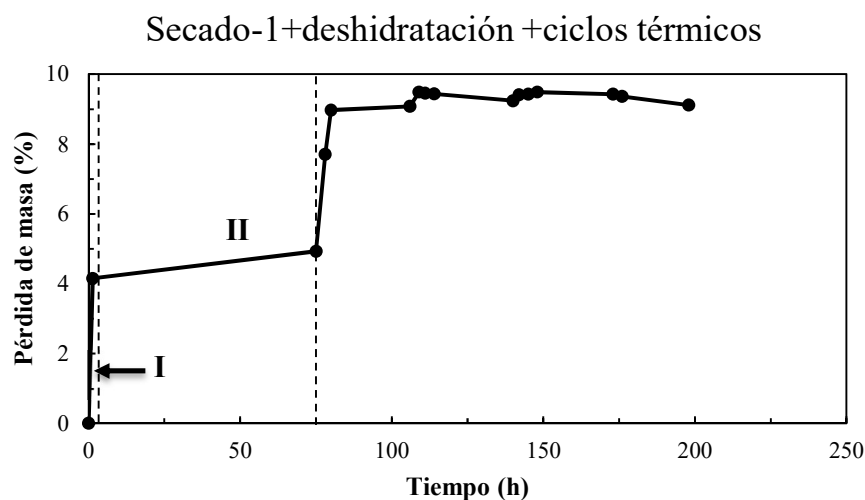


Figura 22: Evolución de la pérdida de masa del mortero ternario-3 durante el secado, deshidratación y ciclos de fatiga a 1°C/min

5.2.2 Conductividad térmica

Etapa 1: Secado y calentamiento hasta 600°C (1°C/min)

En la Figura 23 se ha representado la evolución de la conductividad térmica con la temperatura de los morteros ternarios-1, 2, 3 y silícico-1. Los morteros ternarios-1, 2 y 3 arrojan valores de conductividad térmica a 105°C de 0.88, 0.77, 1.63 W/m·K respectivamente. La diferencia entre ellos podría estar determinada por la edad de los morteros (105, 112, 11 días) o la heterogeneidad del propio material. A partir de 300°C las reacciones de deshidratación del cemento CAC deberían concluir, proceso que podría haber dado lugar a la variación más importante de la conductividad térmica del mortero silícico-1. Se obtuvo un valor de 2.23 y 1.34 W/m·K respectivamente. A pesar de ello, las medidas de conductividad térmica presentan cierta dispersión, producto de las 10 medidas realizadas a cada temperatura de acuerdo al protocolo fijado.

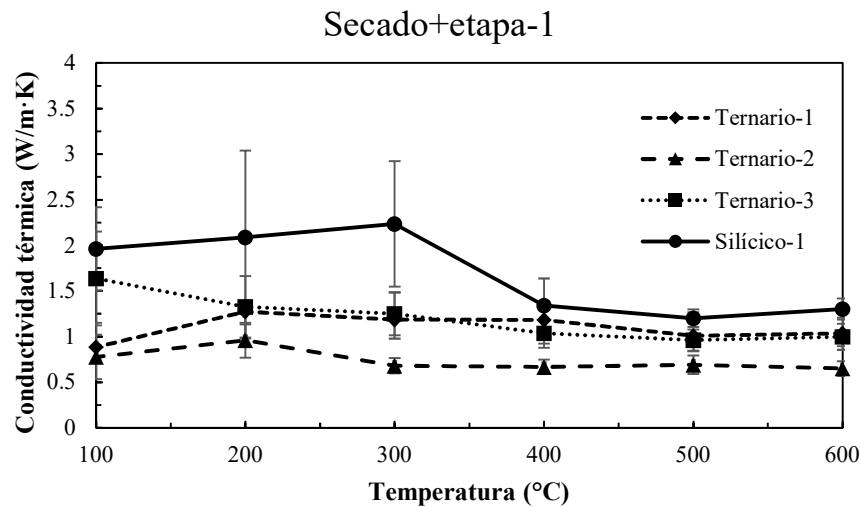


Figura 23: Evolución de la conductividad térmica de los morteros ternario-1, 2, 3 y silícico-1

Etapa 2: Ciclos térmicos entre 300-600°C (1°C/min)

En la Figura 24 se ha representado la conductividad térmica de los distintos morteros durante el primer enfriamiento (600-300°C), segundo calentamiento (300-600°C) y el enfriamiento final (600-300°C). En general, los cambios en la conductividad térmica son del orden de décimas de W/m·K. Sin embargo, existen diferencias entre los diferentes morteros. Como se ha mencionado anteriormente, el mortero silícico presentó valores superiores respecto a los morteros ternarios durante el secado. El 70% en volumen del hormigón está ocupado por áridos, por lo que la mayor conductividad térmica del árido silícico respecto a la mezcla ternaria (basalto, CAT, alentejo) influye de forma notable en la conductividad térmica del material deshidratado. Respecto a los morteros ternario, el 1 y 3 muestran valores muy similares mientras que el ternario-2 muestra una conductividad térmica menor a los anteriores. Estas variaciones pueden deberse al carácter anisótropo del hormigón, así como la heterogeneidad de este. Del mismo modo que durante la etapa-1 y el secado, se obtuvo una dispersión de valores de la conductividad térmica. Sin embargo, el filtrado de datos y el uso de un mismo criterio en todos los casos redujo el error obtenido.

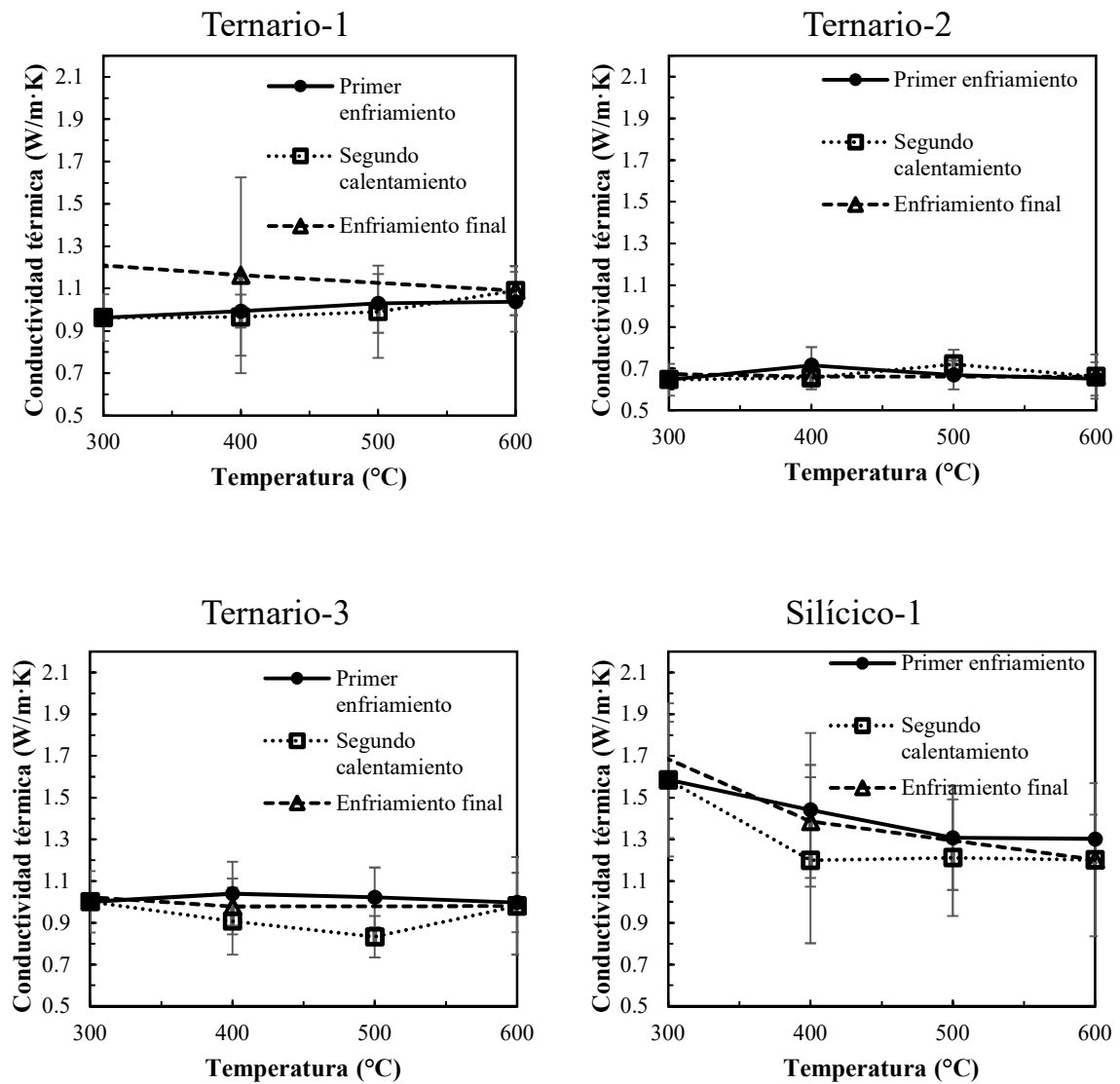


Figura 24: Evolución de la conductividad térmica durante la etapa-2: ciclos térmicos hasta 600°C de los morteros ternario-1, 2, 3 y silíceo-1

6 Conclusiones

Tras la realización del estudio detallado en el presente Proyecto de Fin de Grado, se han determinado una serie de conclusiones que se detallan a continuación en función de los objetivos planteados:

1. Respecto al diseño de diferentes ensayos a elevadas temperaturas que simulen las condiciones en servicio del hormigón para el almacenamiento de energía térmica.

- El registro continuo de la resistencia eléctrica ha permitido detectar la pérdida de agua libre del hormigón
- La medición de variación de la conductividad térmica de un hormigón a alta temperatura precisa ser determinada en estado estacionario tras alcanzar el equilibrio a la temperatura deseada y por la elevada dispersión en la determinación que se tomen al menos 10 medidas por temperatura y condición.

2. Respecto a la evolución de la conductividad térmica del hormigón a alta temperatura.

- La conductividad térmica decrece con el incremento de temperatura siendo el cambio más afectado por la pérdida de agua líquida en los poros
- El tipo de árido tiene un efecto relevante en la conductividad térmica de un hormigón. El árido silíceo ha presentado mayor conductividad térmica que el ternario (mezcla de áridos termo estables) incluso tras la caída de la conductividad durante el secado y deshidratación.
- Los ciclos térmicos de calentamiento enfriamiento mantienen una conductividad térmica estable del material

3. Respecto a la evolución de la resistencia eléctrica durante el secado del hormigón.

- Se confirma que la resistencia eléctrica de un hormigón esta básicamente soportada por el contenido en agua de los poros.
- La medición en continuo permite detectar el punto de secado de un hormigón y pérdida de agua libre detectado mediante un salto en la resistencia eléctrica.

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

4. Respecto a la pérdida de masa debido a los procesos de secado y deshidratación

- La determinación de la pérdida de masa del hormigón a distintas temperaturas ha permitido confirmar los cambios detectados mediante las técnicas no destructivas de resistencia eléctrica y conductividad térmica durante el proceso de secado (pérdida de agua libre) y deshidratación de la pasta (pérdida de agua combinada).

7 Referencias

- [1] BP., "BP statistical review of world energy 2018," 2013.
- [2] C. Mcglade and P. Ekins, "The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C," Jan 8, 2015.
- [3] M. Meinshausen *et al*, "Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 C," *Nature*, vol. 458, (7242), pp. 1158, 2009.
- [4] N. L. Panwar, S. C. Kaushik and S. Kothari, "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, (3), pp. 1513-1524, 2011.
- [5] E. Santoyo-Gutiérrez and I. S. Torres-Alvarado, "Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable," *Revista Digital Universitaria*, vol. 11, (10), pp. 1-26, 2010.
- [6] Anonymous (). *Enel planea invertir hasta \$ 550 millones en plantas geotérmicas en la Toscana, Italia*. Available: <http://www.piensageotermia.com/enel-planea-invertir-hasta-550-millones-en-plantas-geotermicas-en-la-toscana-italia/>.
- [7] R. NUCLEARES, "Introducción a los reactores nucleares," 2008.
- [8] Anonymous (). *For sale: Multibillion-dollar, non-working nuclear power plant, as is*. Available: <https://www.washingtonpost.com/news/morning-mix/wp/2016/09/12/for-sale-5-billion-non-working-nuclear-power-plant-as-is/>.
- [9] M. J. Montes *et al*, "Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors," *Solar Energy*, vol. 83, (12), pp. 2165-2176, 2009.
- [10] I. L. Sánchez, "Estado del arte de tubos receptores para captadores cilindro-parabólicos. Comparación de modelos estáticos," *Departamento De Ingeniería Energética.Grupo Termotecnia.Escuela Técnica Superior De Ingeniería.Universidad De Sevilla*, vol. 28, 2015.
- [11] J. I. Burgaleta, S. Arias and D. Ramirez, "Gemasolar, the first tower thermosolar commercial plant with molten salt storage," in *Proceedings of the SolarPACES 2011 Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Granada, Spain, 2011*, .

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

[12] Anonymous (-04-26T22:05:34+00:00). *Instalación de captadores cilindro-parabólicos con seguimiento solar*. Available: <http://www.agrificiente.cl/instalacion-captadores-cilindro-parabolicos-seguimiento-solar/>.

[13] (). *Linear Fresnel Reflector System*. Available: <http://prashantkarhade.com/concentrated-solar-thermal-technology-part-i/fig-15-3/>.

[14] H. y. Eléctricos. (). *Stirling, un motor cuyo 'combustible' es sólo calor*. Available: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/stirling-un-motor-cuyo-combustible-es-solo-calor/20130226180646004970.html>.

[15] S. Kuravi *et al*, "Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, (4), pp. 285-319, 2013.

[16] B. Stutz *et al*, "Storage of thermal solar energy," *Comptes Rendus Physique*, vol. 18, (7-8), pp. 401-414, 2017.

[17] M. Swiatek, G. Fraisse and M. Pailha, "Stratification enhancement for an integrated collector storage solar water heater (ICSSWH)," *Energy and Buildings*, vol. 106, pp. 35-43, 2015. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815301213>. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.07.005.

[18] J. C. Granja Vaca, *Energia Geotermica*. Available: <http://catalog.hathitrust.org/Record/010135338>.

[19] E. John, M. Hale and P. Selvam, "Concrete as a thermal energy storage medium for thermocline solar energy storage systems," *Solar Energy*, vol. 96, pp. 194-204, 2013.

[20] M. Medrano *et al*, "State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, (1), pp. 56-72, 2010. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001786>. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.036.

[21] (). *Gemasolar, Torresol Energy*. Available: <http://torresolenergy.com/gemasolar/>.

[22] T. Fasquelle *et al*, "Compatibility study between synthetic oil and vitrified wastes for direct thermal energy storage," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 8, (3), pp. 621-631, 2017.

[23] X. Py *et al*, "Recycled Material for Sensible Heat Based Thermal Energy Storage to be Used in Concentrated Solar Thermal Power Plants," *J. Sol. Energy Eng*, vol. 133, (3), pp. 8, 2011. Available: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4004267>. DOI: 10.1115/1.4004267.

- [24] D. Laing, D. Lehmann and C. Bahl, "Concrete storage for solar thermal power plants and industrial process heat," in *3rd International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2008)*, Berlin, 2008, .
- [25] D. A. Cabrera, "Almacenamiento térmico en aplicaciones solares de concentración de alta temperatura," *Proyecto Fin De Carrera.Universidad De Sevilla*, 2012.
- [26] M. Liu, W. Saman and F. Bruno, "Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, (4), pp. 2118-2132, 2012. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112000214>. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.020.
- [27] B. Cárdenas and N. León, "High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 724-737, 2013. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004735>. DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.028.
- [28] L. Zalewski *et al*, "Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material," *Solar Energy*, vol. 86, (1), pp. 208-219, 2012. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11003525>. DOI: 10.1016/j.solener.2011.09.026.
- [29] K. E. N'tsoukpoe, N. Le Pierrès and L. Luo, "Numerical dynamic simulation and analysis of a lithium bromide/water long-term solar heat storage system," *Energy*, vol. 37, (1), pp. 346-358, 2012.
- [30] L. Hui, K. E. N'Tsoukpoe and L. Lingai, "Evaluation of a seasonal storage system of solar energy for house heating using different absorption couples," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, (6), pp. 2427-2436, 2011.
- [31] V. Bricka *et al*, "Evaluation of thermal energy storage potential in low-energy buildings in france," in *ISES Solar World Congress 2011*, 2011, .
- [32] Anonymous "New Storage latent and sensible concept for high efficiency CSP plants (NEWSOL)." Available: <https://www.ietcc.csic.es/projects/new-storage-latent-and-sensible-concept-for-high-efficiency-csp-plants-newsol/>.
- [33] Z. P. Bažant, M. F. Kaplan and Z. P. Bazant, "Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models," 1996.
- [34] D. Laing *et al*, "High-temperature solid-media thermal energy storage for solar thermal power plants," *Proc IEEE*, vol. 100, (2), pp. 516-524, 2012.

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

[35] J. E. Pacheco, S. K. Showalter and W. J. Kolb, "Development of a molten-salt thermocline storage system for parabolic trough plants," *Solar Energy*, 2001.

[36] J. M. C. Rodado, "System for storing thermal energy," *System for Storing Thermal Energy*, 2015.

[37] M. C. Alonso *et al*, "Calcium aluminate based cement for concrete to be used as thermal energy storage in solar thermal electricity plants," *Cem. Concr. Res.*, vol. 82, pp. 74-86, 2016.

[38] N. Hoivik *et al*, "Demonstration of EnergyNest thermal energy storage (TES) technology," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1850, (1), 2017. Available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4984432>. DOI: 10.1063/1.4984432.

[39] S. Chinchón Yepes and M. Á Sanjuan Barbudo, *El Cemento De Aluminato De Calcio Y Sus Prefabricados*. Alicante: Publicacions Universitat Alacant, 2014.

[40] A. M. Neville and J. J. Brooks, *Concrete Technology*. 1987.

[41] Y. El Hafiane *et al*, "Calcium aluminate cement tapes—Part II: Physical properties," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 34, (4), pp. 1025-1033, 2014.

[42] W. T. Bakker, "Properties of Refractory Concretes," *Special Publication*, vol. 57, pp. 11-52, 1978.

[43] P. Pimienta, R. J. McNamee and J. Mindeguia, "Physical Properties and Behaviour of High-Performance Concrete at High Temperature," .

[44] G. A. Khoury, B. N. Grainger and P. J. Sullivan, "Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behaviour of individual constituents," *Magazine of Concrete Research*, vol. 37, (132), pp. 131-144, 1985.

[45] I. Hager, "No title," *Thermal Behaviour of High Performance Concretes at High Temperature—evolution of Mechanical Properties*, 2004.

[46] J. C. Mindeguia *et al*, "Experimental study of transient thermal strain and creep of an ordinary concrete at high temperatures," in *Proc. 4th Int. Workshop Structures in Fire (SIF'2006)*, 2006, .

[47] H. Layssi *et al*, "Electrical resistivity of concrete," *Concr. Int.*, vol. 37, (5), pp. 41-46, 2015.

[48] F. Rajabipour, J. Weiss and D. M. Abraham, "Insitu electrical conductivity measurements to assess moisture and ionic transport in concrete (A discussion of critical

features that influence the measurements)," in *Proceedings of the International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur*, 2004, .

[49] H. W. Whittington, J. McCarter and M. C. Forde, "The conduction of electricity through concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 33, (114), pp. 48-60, 1981.

[50] M. G. Van Geem, J. Gajda and K. Dombrowski, "Thermal properties of commercially available high-strength concretes," *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 19, (1), pp. 38-54, 1997.

[51] N. G. Zoldners, "Thermal properties of concrete under sustained elevated temperatures," *Special Publication*, vol. 25, pp. 1-32, 1971.

[52] K. Ödeen and Å Nordström, "Thermal properties for concrete at high temperatures," *Statens Provningsanstalt, Brandtekniska Laboratoriet, Stockholm*, 1972.

[53] J. Toman and R. Černý, "Thermal conductivity of high performance concrete in wide temperature and moisture ranges," *Acta Polytechnica*, vol. 41, (1), 2001.

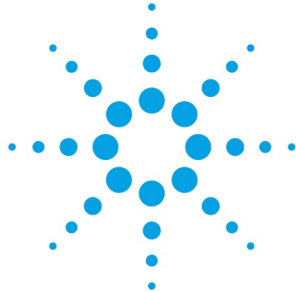
[54] Anonymous (). *Cemento de aluminato de calcio CAC-R (Ciments Molins)*. Available: /cmematerials/es/content/cemento-de-aluminato-de-calcio-cac-r-ciments-molins.

[55] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentos De Transferencia De Calor*. 1999.

8 Anexos

8.1 Unidad de adquisición de datos Agilent 34970A

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura



Agilent 34970A Familia de unidades de adquisición de datos/ conmutación

Descripción de producto

34970A

34972A



Rendimiento Agilent por una mínima parte del coste de otros sistemas de adquisición de datos independientes

- Mainframe de 3 ranuras con multímetro digital de 6½ dígitos incorporado y 8 módulos conectables de conmutación y de control opcionales
- Mide y convierte 11 señales de entrada distintas: temperatura con termopares, RTD y termistores; tensión DC/AC; resistencia a 2 y 4 hilos; frecuencia y periodo; corriente DC/AC
- Opciones de I/O Gigabit LAN, USB, GPIB o RS-232 para facilitar la conectividad con el PC
- Interfaz gráfica web para monitorización y control mediante el ratón (34972A)
- Compatibilidad con unidades USB Flash para copiar/registrarse datos en aplicaciones independientes (34972A)
- Incluye el software BenchLink Data Logger para configurar y controlar pruebas, mostrar resultados y recopilar datos para su posterior análisis



Agilent Technologies

Más potencia y flexibilidad de la que nunca haya podido imaginar

El multímetro digital interno de 6½ dígitos (22 bits) mide 11 funciones sin acondicionamiento externo de la señal

Intuitivo panel frontal con menús de autoguía y orientados a tareas

La memoria no volátil de 50 000 lecturas conserva los datos cuando no hay energía



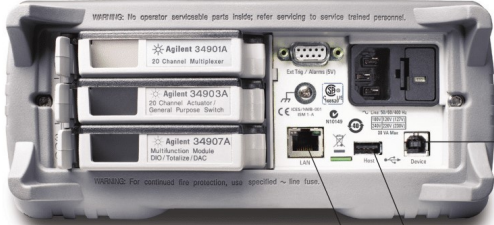
Modo de monitorización para supervisar las pruebas en marcha

Función de escalado para convertir datos brutos en las unidades definidas por el usuario

Limites de alarma HI/LO en cada canal de entrada más 4 salidas de alarma TTL

Reloj en tiempo real con batería para marcar los barridos y la información temporal de las medidas

34972A

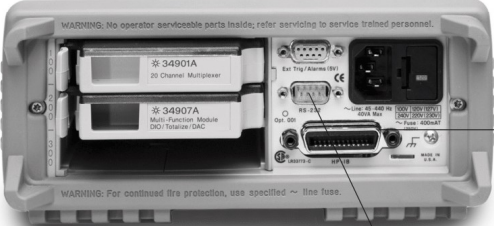


USB

Puerto de memoria USB para registrar/transferir datos a una unidad USB Flash

Puertos LAN y USB incorporados para conexión inmediata a un PC

34970A



GPIB

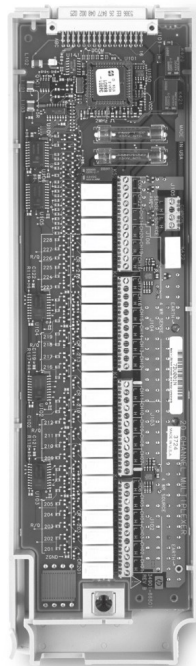
Interfaces GPIB y RS-232 incorporadas en 34970A

- Hasta 96 puntos de cruce de matriz o 120 canales single-ended
- Ocho módulos conectables de conmutación y de control a elegir
- Agilent BenchLink Data Logger 3, drivers IVI-CC, IVI-COM y drivers para Agilent VEE y NI LabView incluidos

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

La unidad 34970A/34972A de Agilent ofrece una versatilidad sin precedentes para aplicaciones de adquisición de datos

En el pasado, había que elegir: por un lado, podíamos disfrutar del funcionamiento sencillo y el bajo coste de un registrador de datos; por otro lado, estaba la flexibilidad y el alto rendimiento de los sistemas de adquisición de datos modulares. Con la unidad de adquisición de datos/conmutación 34970A/34972A de Agilent ya no tiene que elegir: dispondrá de una interfaz de usuario sencilla con un coste por canal mínimo, flexibilidad modular, conectividad estándar y un rendimiento de medida impresionante.



¿Es ingeniero de I+D y necesita caracterizar su último diseño? ¿O un ingeniero de fabricación y quiere construir un sistema de pruebas o solucionar los problemas de un proceso? La unidad de adquisición de datos/conmutación 34970A/34972A ofrece la mejor relación precio-rendimiento de medida.

Un registrador de datos

Configurada con un multiplexor de relé de 20 canales, la unidad 34970A/34972A se convierte en un potente y económico registrador de datos para aplicaciones de caracterización simples. Aún más, las interfaces LAN y USB de la unidad 34972A hacen que resulte ideal para configurar y controlar aplicaciones de registro de datos en ubicaciones remotas. Para más información sobre el uso de la unidad 34970A/34972A para aplicaciones de registro de datos, consulte la página 8.

Una entrada de adquisición de datos

La unidad 34970A/34972A constituye un sistema de prueba automatizado con un excelente rendimiento de medida, con la precisión, resolución y velocidad necesarias. Para obtener información de aplicación, consulte la página 10.

Un sistema de conmutación

Solicite el mainframe sin el multímetro digital interno y tendrá una solución de enrutamiento de señales de alta calidad a un precio aún menor. Para más información, consulte la página 12.

Y la 34970A/34972A mide y convierte 11 señales de entrada distintas:

- Temperatura con termopares, RTD y termistores
- Tension DC y AC
- Resistencia a 2 y 4 hilos
- Frecuencia y periodo
- Corriente DC y AC

Además, cada canal se configura de forma independiente. Esto significa que puede configurar el canal 1 para DCV, el canal 2 para un termopar de tipo K y los canales 3 y 13 para la medida RTD a 4 hilos, todo en el mismo módulo y en un único barrido. Para conversiones lineales personalizadas, utilice la función de escalado $Mx + B$ en cualquier canal. Incluso puede visualizarse una etiqueta personalizada de 3 caracteres, como RPM o PSI, para identificar sus unidades de medida.

Alarmas versátiles

Las alarmas también están disponibles por cada canal. Introduzca un límite alto, un límite bajo o ambos. La unidad 34970A/34972A compara cada lectura con sus límites e identifica las medidas fuera de rango. Puede asignar una de las 4 salidas de alarma TTL a cualquier canal de entrada para disparar luces de alarma externas, sirenas o para enviar un pulso TTL al sistema de control, todo ello sin necesidad de tener un PC conectado.

Barridos más simples

La unidad 34970A/34972A genera automáticamente una lista de barrido que incluye todas las entradas configuradas (incluyendo las entradas digitales del módulo multifunción 34907A de Agilent) en orden ascendente según el número de canal. Puede definir el ritmo de los barridos ajustando el temporizador interno de la unidad 34970A/34972A para que realice un barrido automático a intervalos regulares, pulsando manualmente un botón del panel frontal o enviando un comando de software o un pulso de disparo TTL externo.

Monitoree cualquier entrada

Un modo de visualización especial monitoriza un canal de entrada seleccionado, actualizando continuamente la pantalla con nuevas lecturas, incluso durante un barrido. O bien, si se utiliza la unidad 34972A con LAN incorporada, los canales se pueden monitorizar en red usando la interfaz gráfica web. Resulta ideal para vigilar una entrada clave o para solucionar problemas en el sistema antes de una prueba.

La memoria no volátil y la unidad USB Flash añaden portabilidad y comodidad

Todas las lecturas se registran con información temporal automáticamente y se almacenan en una memoria no volátil de 50 000 lecturas: suficiente para guardar los datos de más de una semana de trabajo (20 canales explorados cada 5 minutos). La memoria no volátil conserva los datos incluso tras cortar la alimentación, por lo que puede usar la unidad 34970A/34972A para recopilar datos en una ubicación remota y luego cargarlos en un PC. Y si necesita aún más memoria, el puerto USB de la unidad 34972A puede utilizarse para registrar los datos directamente en una unidad USB Flash o copiarlos desde la memoria de lectura sin tener que conectar un ordenador.

Lista de características del registro de datos

- De 1 a 120 canales de entrada analógica
- Medidas de tensiones DC y AC, de temperatura con termopar, RTD y termistor, resistencia a 2 y 4 hilos, corriente DC y AC, frecuencia y periodo
- 6½ dígitos (22 bits) de resolución con precisión de DCV básica a un año del 0,004 %
- 50 000 lecturas de memoria no volátil, incluido registro en función del tiempo
- Escala y alarmas disponibles en cada canal
- Panel frontal con todas las funciones para una configuración independiente, solución de problemas y visualización de datos
- Software BenchLink Data Logger 3 para configuración y análisis de datos
- Almacenamiento no volátil para 5 estados de instrumentos completos
- Interfaces LAN o USB incorporadas para dar soporte a las aplicaciones de registro de datos remoto (solo 34972A)

Análisis de la variación de propiedades termofísicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

Drivers

Saque el máximo partido al tiempo de desarrollo de software para sistemas de pruebas. La unidad 34970A/34972A dispone de drivers compatibles con C, C#, Visual Basic, Visual Studio, Agilent VEE y National Instruments LabView® para facilitar la integración en su sistema de pruebas. Las interfaces estándar RS-232 y GPIB de la unidad 34970A, o LAN y USB de la 34972A, así como el lenguaje de programación SCPI, facilitan aún más esta integración.

Lista de características del equipo de prueba automatizado

- Mainframe de tarjetas con 3 ranuras y multímetro digital interno de 6½ dígitos (22 bits)
- Precisión de DCV básica a un año del 0,004 %; precisión de ACV del 0,06%
- Hasta 120 medidas unipolares o 96 puntos de cruce de matriz en un instrumento de media anchura de rack de 3½" de altura
- Ocho módulos de conmutación y de control incluyen multiplexores de radiofrecuencia y baja frecuencia, conmutadores matriciales y de actuación, entrada y salida digital, salida analógica y registro de eventos
- Velocidades de barrido de hasta 250 canales/s
- Interfaces GPIB y RS-232 de 115 kbaudios estándar (34970A)
- Interfaz gráfica web para acelerar el desarrollo de pruebas y monitorizar pruebas de forma remota (34972A)
- Drivers disponibles para dar soporte a Agilent VEE y National Instruments LabView
- Función de mantenimiento de relé para el mantenimiento del sistema



Sistema compacto de adquisición de datos de 60 canales

Especificaciones de precisión del 34970A/34972A ± (% de lectura + % de rango)^[1]

Incluye error de medida, error del conmutación y error de conversión del transductor

Rango ^[3]		Frecuencia, etc.	24 horas ^[1] 23 °C ±1 °C	90 días 23 °C ±5 °C	Un año 23 °C ±5 °C	Coefficiente de temperatura 0 °C–18 °C, 28 °C–55 °C	
Tensión DC							
100,0000 mV 1,000000 V 10,00000 V 100,0000 V 300,000 V			0,0030 + 0,0035	0,0040 + 0,0040	0,0050 + 0,0040	0,0005 + 0,0005	
			0,0020 + 0,0006	0,0030 + 0,0007	0,0040 + 0,0007	0,0005 + 0,0001	
			0,0015 + 0,0004	0,0020 + 0,0005	0,0035 + 0,0005	0,0005 + 0,0001	
			0,0020 + 0,0006	0,0035 + 0,0006	0,0045 + 0,0006	0,0005 + 0,0001	
			0,0020 + 0,0020	0,0035 + 0,0030	0,0045 + 0,0030	0,0005 + 0,0003	
RMS reales de tensión AC ^[4]							
Todos los rangos a partir de 100,0000 mV a 100,0000 V	3 Hz-5 Hz	1,00 + 0,03	1,00 + 0,04	1,00 + 0,04	1,00 + 0,04	0,100 + 0,004	
	5 Hz-10 Hz	0,35 + 0,03	0,35 + 0,04	0,35 + 0,04	0,35 + 0,04	0,035 + 0,004	
	10 Hz-20 kHz	0,04 + 0,03	0,05 + 0,04	0,06 + 0,04	0,06 + 0,04	0,005 + 0,004	
	20 kHz-50 kHz	0,10 + 0,05	0,11 + 0,05	0,12 + 0,05	0,12 + 0,05	0,011 + 0,005	
	50 kHz-100 kHz	0,55 + 0,08	0,60 + 0,08	0,60 + 0,08	0,60 + 0,08	0,060 + 0,008	
	100 kHz–300 kHz ^[5]	4,00 + 0,50	4,00 + 0,50	4,00 + 0,50	4,00 + 0,50	0,20 + 0,02	
	300,0000 V	3 Hz-5 Hz	1,00 + 0,05	1,00 + 0,08	1,00 + 0,08	1,00 + 0,08	0,100 + 0,008
		5 Hz-10 Hz	0,35 + 0,05	0,35 + 0,08	0,35 + 0,08	0,35 + 0,08	0,035 + 0,008
		10 Hz-20 kHz	0,04 + 0,05	0,05 + 0,08	0,06 + 0,08	0,06 + 0,08	0,005 + 0,008
		20 kHz-50 kHz	0,10 + 0,10	0,11 + 0,12	0,12 + 0,12	0,12 + 0,12	0,011 + 0,012
		50 kHz-100 kHz	0,55 + 0,20	0,60 + 0,20	0,60 + 0,20	0,60 + 0,20	0,060 + 0,020
		100 kHz–300 kHz ^[5]	4,00 + 1,25	4,00 + 1,25	4,00 + 1,25	4,00 + 1,25	0,20 + 0,05
Resistencia ^[6]							
100,0000 Ω	Fuente de corriente de 1 mA	0,0030 + 0,0035	0,008 + 0,004	0,010 + 0,004	0,0006 + 0,0005		
1,000000 kΩ	1 mA	0,0020 + 0,0006	0,008 + 0,001	0,010 + 0,001	0,0006 + 0,0001		
10,00000 kΩ	100 µA	0,0020 + 0,0005	0,008 + 0,001	0,010 + 0,001	0,0006 + 0,0001		
100,0000 kΩ	10 µA	0,0020 + 0,0005	0,008 + 0,001	0,010 + 0,001	0,0006 + 0,0001		
1,000000 MΩ	5,0 µA	0,002 + 0,001	0,008 + 0,001	0,010 + 0,001	0,0010 + 0,0002		
10,00000 MΩ	500 nA	0,015 + 0,001	0,020 + 0,001	0,040 + 0,001	0,0030 + 0,0004		
100,0000 MΩ	500 nA 10 MΩ	0,300 + 0,010	0,800 + 0,010	0,800 + 0,010	0,1500 + 0,0002		
Frecuencia y período ^[7]							
100 mV a 300 V	3 Hz-5 Hz	0,10	0,10	0,10	0,005		
	5 Hz-10 Hz	0,05	0,05	0,05	0,005		
	10 Hz-40 Hz	0,03	0,03	0,03	0,001		
	40 Hz-300 kHz	0,006	0,01	0,01	0,001		
Corriente DC (solo 34901A)							
10,00000 mA	< 0,1 V de carga	0,005 + 0,010	0,030 + 0,020	0,050 + 0,020	0,002 + 0,0020		
100,0000 mA	< 0,6 V	0,010 + 0,004	0,030 + 0,005	0,050 + 0,005	0,002 + 0,0005		
1,000000 A	< 2 V	0,050 + 0,006	0,080 + 0,010	0,100 + 0,010	0,005 + 0,0010		
RMS reales de corriente AC (solo 34901A)							
10,00000 mA y ^[4] 1,000000 A	3 Hz-5 Hz	1,00 + 0,04	1,00 + 0,04	1,00 + 0,04	0,100 + 0,006		
	5 Hz-10 Hz	0,30 + 0,04	0,30 + 0,04	0,30 + 0,04	0,035 + 0,006		
	10 Hz-5 kHz	0,10 + 0,04	0,10 + 0,04	0,10 + 0,04	0,015 + 0,006		
	100,0000 mA ^[8]	3 Hz-5 Hz	1,00 + 0,5	1,00 + 0,5	1,00 + 0,5	0,100 + 0,06	
		5 Hz-10 Hz	0,30 + 0,5	0,30 + 0,5	0,30 + 0,5	0,035 + 0,06	
		10 Hz-5 kHz	0,10 + 0,5	0,10 + 0,5	0,10 + 0,5	0,015 + 0,06	
Temperatura							
Termopar ^[9]	Tipo	Precisión a un año ^[9]		Precisión a un año de rango ampliado ^[9]		Coefficiente de temperatura/°C	
	B	De 1 100 °C a 1 820 °C	1,2 °C	De 400 °C a 1 100 °C	1,8 °C		
	E	De -150 °C a 1 000 °C	1,0 °C	De -200 °C a -150 °C	1,5 °C		
	J	De -150 °C a 1 200 °C	1,0 °C	De -210 °C a -150 °C	1,2 °C		
	K	De -100 °C a 1 200 °C	1,0 °C	De -200 °C a -100 °C	1,5 °C	0,03 °C	
	N	De -100 °C a 1 300 °C	1,0 °C	De -200 °C a -100 °C	1,5 °C		
	R	De 300 °C a 1 760 °C	1,2 °C	De -50 °C a 300 °C	1,8 °C		
	S	De 400 °C a 1 760 °C	1,2 °C	De -50 °C a 400 °C	1,8 °C		
	T	De -100 °C a 400 °C	1,0 °C	De -200 °C a -100 °C	1,5 °C		
RTD							
R _n de 49 Ω a 2,1 kΩ	De -200 °C a 600 °C	0,06 °C				0,003 °C	
Termistor	2,2 k, 5 k, 10 k	De -80 °C a 150 °C	0,08 °C			0,002 °C	

[1] Especificaciones para una hora de calentamiento y 6½ dígitos, filtro de AC lento

[2] Con relación a los estándares de calibración

[3] 20 % por encima del rango en todos los rangos salvo 300 VDC y rangos AC, y 1 ADC y rangos de corriente AC

[4] Para una entrada de onda sinusoidal > 5 % del rango. Para entradas del 1 % a 5 % del rango y de < 50 kHz, añádase un 0,1 % de error adicional de rango

[5] Normalmente, 30 % de error de lectura a 1 MHz, limitado a 1 x 10⁶ V Hz

[6] Especificaciones para función de resistencia a 4 hilos o resistencia a 2 hilos usando escalado para eliminar el offset. Sin escalado, añádase un error adicional de 4 Ω en la función de resistencia a 2 hilos

[7] Entrada > 100 mV. Para entradas de 10 mV a 100 mV, multiplíquese el % de error de lectura x 10

[8] Especificado solo para entradas >10 mA

[9] Para la precisión de medida total, añádase el error de la sonda de temperatura

[10] Especificaciones de termopar no garantizadas si está presente el módulo 34970A

Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

8.2 Equipo de conductividad QTM-700/710 Kyoto Electronics



Quick Thermal Conductivity Meter

QTM-710/700



KEM KYOTO ELECTRONICS
MANUFACTURING CO., LTD.

SUMMARY

Quick and Easy Measurement of Thermal Conductivity of Sample!

The thermal conductivity of various samples such as block form or sheet in manufacturing, construction, handcraft, soil or food industry is possible to measure with Quick Thermal Conductivity Meter QTM-710/700.

The thermal conductivity can be measured in a short time, with ease and in a good reproduction just by measuring to place the probe on the sample surface of the uniform temperature.

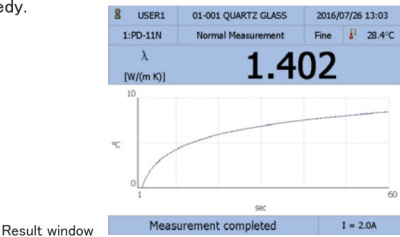
- Thermal insulating material of fiber or foamed plastic
- Plastic, Glass, Wood, etc.
- Sheet, Leather, etc.
- Bread dough, Mashed food, Powder, etc.
- High heat insulation material, Ceramics, etc.



FEATURE

Clear and easy operation with the touch-screen of 5.7 inch color LCD

Intuitive operation is possible with touch-screen.
History of measured values can be seen by pressing the display of the measurement result once, and necessary information and operation menu is displayed speedy.
Result window



Quick measurement with 3ch probes

Solid and film can be measured continuously without changing the probe when the same type or other types of various probes are connected.

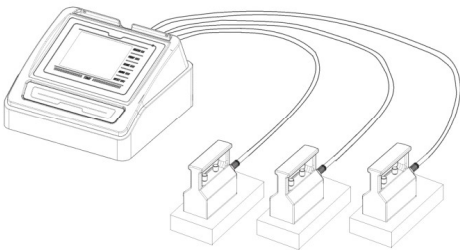
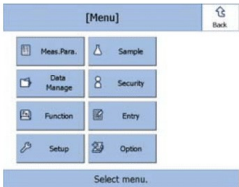


Image of connection of various probes

Security function

Password setting and security level can be selected in accordance with the intended use and the environment.
Operation is possible to limit in the proper use of manager and users.



Easy data transfer with USB

Measurement data transfer to personal computer is easy with USB.
Data is possible to view and edit in the spreadsheet software because since being saved in CSV format.



Probe is compliant with traceability.

Traceability system of the thermal conductivity standard substance (reference plate) is established for the purpose of further improvement of the reliability of the measured values.



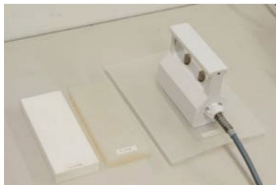
Análisis de la variación de propiedades termo físicas del hormigón expuesto a procesos de alta temperatura

FEATURE

Built-in Thin film measurement QTM-710

Thermal conductivity of the sheeted sample such as a film and a sheet of fiber products is possible to measure.

The result is easy to analyze since an average calculation of the measured value and rise temperature features is able to display.

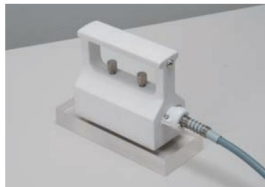


The measurement of the sheeted sample is possible without personal computer, and the detailed result can be printed to connect with A4 printer.

Model:	QTM-710	Print:	2015/07/26 14:40				
Serial:		Page:	1/1				
Operator:	User	Date:	2015/11/19 12:19				
Sample No:	15-001	Sample ID:	TF 0.3mm PD-11 6 Q3				
Probe Model:	Thin Film Measurement						
Probe Unit:	PD-11N						
Probe No:	00006						
Probe Const:	Main						
λ :	0.2030 [W/(m K)]						
	λ [W/(m K)]	1st	2nd	3rd	4th	5th	AVG
Polye No.6 (QTM70003)	0.03037	0.0303	0.0304	0.0302	0.0294	0.0451	0.0307
Siliconoil.6 (QTM70003)	0.2228	-0.03954	-0.02269	-0.03809	-0.01006	-0.03984	-0.03184
Quartzoil.6 (QTM70003)	1.425	-0.3844	-0.4255	-0.4093	-0.3787	-0.4787	-0.4149

Box type probe PD-11N QTM-710 QTM-700

Thermal conductivity is easy to measure just when placing the probe on the smooth surface of a sample. Various measurements of the sample in block, powder and sheet are possible with PD-11N.



- Heat insulation material
- Ceramics
- Rubber
- Plastic
- Glass

Insulated moisture-proof probe PD-13N QTM-710 QTM-700

PD-13N is covered the insulation film to PD-11N.

Thermal conductivity of aqueous materials and conductive materials are possible to measure with PD-13N.



- Food
- Concrete paste
- Metal

High-temperature probe PD-31N QTM-710 QTM-700

Thermal conductivity is measured by being sandwiched the heater and the temperature sensor with the same samples. PD-31N is a conventional type of sensor and the thermal conductivity in higher temperature range is possible to measure with PD-31N.



- New material
- Firebrick
- Heat insulation material

Vessel for powder QTM-710 QTM-700

Thermal conductivity in the bulk density of the powder sample is possible to measure with the optional vessel for powder (with a scale).

(The mass of the collected sample is necessary.)

※The calculation of bulk density is required the mass of the sample.



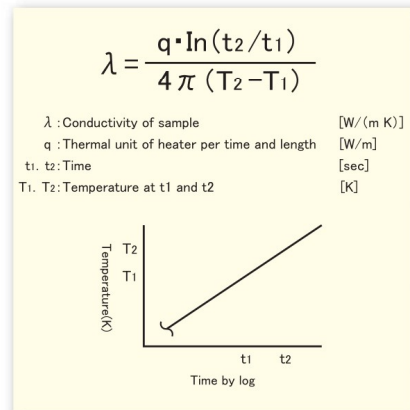
MEASUREMENT PRINCIPLE

Hot Wire Method (Transient Hot Wire Method)

The temperature of the heater wire will rise since the heat is generated when applying the constant current to the heater wire stretched in a straight line inside the sample. The temperature rise will be a straight line as shown in the right figure when the time axis is switched to a logarithmic scale.

The angle of this straight line is in reverse proportion to the thermal conductivity of the sample. The angle becomes large if the thermal conductivity of the sample is low, and the angle becomes small if it is high. Therefore, the thermal conductivity can be obtained from this angle.

QTM-710/700 measures the thermal conductivity with Box type probe (PD-11N and PD-13N) which applies Hot wire method and High-temperature probe (PD-31N) based on Hot wire method.



Thin film measurement

Measurement of thin sheet sample for thermal conductivity is based on the comparison of sample with a reference plate in temperature rise when both of them are heated by the probe.

Before measurement, prepare two to four homogeneous samples of known thermal conductivity. (Fig. 1.)

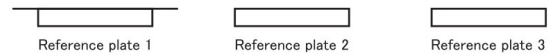


Fig. 1 Measuring method

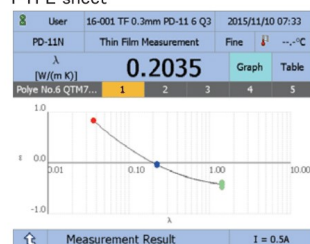
Place a sample closely on the plate and heat it by the probe. Then, monitor the temperature rise versus logarithmic time for some period to find the deviation from the initial state. Apply this method to a couple of plates and obtain the relation between the thermal conductivity and the deviation.

When the thermal conductivity of the sample is higher than that of reference plate, the deviation becomes positive value, and when it is lower, the deviation becomes negative.

Find the point of intersection where the deviation equals zero on the ε (deviation) versus λ (thermal conductivity) plot.

Measurement example (Thin film measurement)

PTFE sheet



Ref	Ref λ	1	2	3	4	5	AVG
Polye No.6 QTM	0.03637	0.8303	0.8394	0.8342	0.8294	0.8451	0.8357
Silicone No.6 QTM	0.2228	-0.03954	-0.02269	-0.03809	-0.01906	-0.03984	-0.03184
Quartz No.6 QTM	1.425	-0.3844	-0.4255	-0.4093	-0.3787	-0.4767	-0.4149

PRODUCT STRUCTURE / SPECIFICATION

Product structure

■ QTM-710 <For sheet sample>

- Main unit
- Aluminum cooling plate
- Reference plate (Clear quartz/Silicone rubber/Polyethylene foam)
- Probe is selectable (PD-11N or PD-13N)

■ QTM-700 <Not for sheet sample>※

- Main unit
- Aluminum cooling plate
- Reference plate (Silicone rubber)
- PD-11N or PD-13N

※Note that the thin sheet sample is unable to measure with QTM-700.

Specification

Specification	Contents	
Name	Quick Thermal Conductivity Meter	
Type	QTM-710	QTM-700
Method	Hot Wire Method	
Accuracy ^{※1}	Within $\pm 5\%$ reading value per reference plate ^{※2} (room temp. only)	
Repeatability ^{※1}	3% (at the measurement of reference plate)	
Thin film measurement	Able	Unable
On-window display	5.7 inch color LCD	
Language	English / Japanese	
External I/O	RS232C : 2ch (Printer, Data Acquisition Software) USB : 2ch (Printer, USB flash drive)	
Ambient conditions	Temperature : 5 to 35°C Humidity : 85%RH or below (no condensation)	
Power supply	DC24V 5A (main unit), AC100-240V $\pm 10\%$ 50/60Hz (AC adaptor)	
Dimensions	262(W) \times 276(D) \times 158(H) mm	
Weight	Approx. 4kg	
CE marking	CE marking (EN61326-1, EN61010-1), suitable for RoHS	

※1 Accuracy and Repeatability of Thin film measurement depend on the state of the sample.

※2 Reference plate (Quartz glass / Silicone rubber / Polyethylene foam)

<Normal measurement>

Probe	Box type probe PD-11N	Insulated moisture-proof probe PD-13N	High-temperature probe PD-31N
Method	Hot Wire Probe Method		Hot Wire Method
Measurement range	0.03~12W/(m K)		0.06~5W/(m K)
Dimensions	110(W) \times 50(D) \times 100(H) mm		
Measurement temperature	5~35°C		-100~1000°C
Measurement time	60sec		60sec [※]
Sample size	100 \times 50 \times 20 mm or more		100 \times 50 \times 20 mm or more 2 pieces

※Optionally set the measurement time.

<Thin film measurement>

Probe	Box type probe PD-11N	Insulated moisture-proof probe PD-13N
Measurement range	0.03~5W/(m K)	
Measurement temperature	5~35°C	
Measurement time	60sec	
Sample size	Size: 100 \times 50 mm or more Thickness: Indication as to the thermal conductivity of the sample. 0.1W/(m K) \rightarrow 0.1mm or more 5 W/(m K) \rightarrow 5mm or more	

OPTION

Part Number	Part Description	Remarks
12-06477	PD-11N Box type probe	
12-06477-01	PD-13N Insulated moisture-proof probe	
12-06479	PD-31N High-temperature probe	
12-06753	Reference plate/Clear quartz for QTM-700	Approx. $\lambda = 1.4 \text{ W/(m K)}$
12-06753-01	Reference plate/Silicone rubber for QTM-700	Approx. $\lambda = 0.2 \text{ W/(m K)}$
12-06753-02	Reference plate/Polyethylene foam for QTM-700	Approx. $\lambda = 0.03 \text{ W/(m K)}$
12-06753-03	Plate/Silicone sponge H for QTM-700	Approx. $\lambda = 0.07 \text{ W/(m K)}$
12-06753-04	Plate/Silicone sponge L for QTM-700	Approx. $\lambda = 0.1 \text{ W/(m K)}$
12-06753-05	Plate/Zirconia for QTM-700	Approx. $\lambda = 3 \text{ W/(m K)}$
12-06753-06	Plate/Mullite for QTM-700	Approx. $\lambda = 5 \text{ W/(m K)}$
12-06753-07	Plate/Hastelloy C for QTM-700	Approx. $\lambda = 9 \text{ W/(m K)}$
20-07341	Aluminum cooling plate	
12-01876	Vessel for powder	for PD-11N
69-00670	Brush	
IDP-100	Dot Matrix Printer	
64-00625	Connection Cable M-677 MiniDIN8P-DSUB9PM	for IDP-100/SOFT-CAP
12-02013	RS-232C Connection Cable (9P-25P) 1m	for IDP-100
12-04260	Printing Roll RP5860 4rolls Set	for IDP-100
69-00719	Ribbon Cartridge IR-91B Black	for IDP-100
DP-600	Thermal Printer	
64-00643-03	USB2.0 Cable L=0.9m USB2-AMBM-03	for DP-600
69-00522-01	Thermal Roll Paper P-58-30 (10 rolls)	for DP-600
12-03265	Data Acquisition Software	
12-02012	RS-232C Connection Cable (9P-9P) 2m	for SOFT-CAP
64-00177-00	USB Serial Transducer US232R-10	for SOFT-CAP

The above Reference plates and Plates are also common to QTM-710.



Thermal Printer
DP-600



Dot Matrix Printer
IDP-100



Vessel for powder
12-01876



Reference plate/Aluminum cooling plate